



ISSN 2587-9006

Воронежский государственный  
технический университет

Химия, физика и механика  
материалов

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Выпуск 1(32), 2022

ISSN 2587-9006

*ФГБОУ ВО «ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»*

**ХИМИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА  
МАТЕРИАЛОВ**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

- МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
- СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА
- ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЬ. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ
- МЕМБРАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
- ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ
- ПЕРСОНАЛИИ

**Выпуск № 1 (32), 2022**

## **ХИМИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ**

### **НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

**Выходит 4 раза в год**

Учредитель и издатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет»  
Адрес учредителя и издателя: 394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77 - 77347 от 05.12.2019).

Главный редактор – д-р хим. наук, проф. О.Б. Рудаков  
Зам. главного редактора – д-р техн. наук, проф. В.Т. Перцев  
Зам. главного редактора – д-р техн. наук, проф. В.А. Небольсин  
Ответственный секретарь – канд. техн. наук, доц. О.Б. Кукина

Редакционная коллегия:

Д-р техн. наук, проф. О.В. Артамонова (г. Воронеж, ВГТУ); д-р техн. наук, проф. Д.Е. Барабаш (г. Воронеж, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»); д-р хим. наук, проф. А.В. Белик (г. Челябинск, ЧГУ), д-р техн. наук, проф. В.В. Белов (г. Тверь, ТвГТУ); д-р техн. наук, проф. А.Ф. Бурьянов (г. Москва, МГСУ), д-р физ.-мат. наук, проф. П.А. Головинский (г. Воронеж, ВГТУ); д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАН В.М. Иевлев (г. Москва, МГУ), д-р хим. наук, проф. А.В. Калач (г. Воронеж, ВИ ФСИН); д-р физ.-мат. наук, проф. Ю.Е. Калинин (г. Воронеж, ВГТУ), д-р физ.-мат. наук, проф. В.А. Козлов (г. Воронеж, ВГТУ), д-р техн. наук Д.Н. Коротких (г. Москва, МГСУ); д-р техн. наук, проф. В.Я. Манохин (г. Воронеж, ВГТУ); д-р техн. наук, проф. В.Я. Мищенко (г. Воронеж, ВГТУ); д-р техн. наук, проф. С.И. Лазарев (Тамбов, ТГТУ), д-р техн. наук, проф. Л.В. Моргун (г. Ростов-на-Дону, ДГТУ); д-р техн. наук, проф. Г.В. Несветаев (г. Ростов-на-Дону, ДГТУ); д-р техн. наук, доц. В.А. Небольсин (г. Воронеж, ВГТУ), д-р техн. наук, проф. Г.И. Овчаренко (г. Барнаул, АлтГТУ), д-р техн. наук, проф. С.Л. Подвальный (Воронеж, ВГТУ), д-р техн. наук, проф. К.К. Полянский (г. Воронеж, ВФ РЭУ им. Г.В. Плеханова); д-р техн. наук, проф. Ю.В. Пухаренко (г. Санкт-Петербург, СПбГАСУ); д-р техн. наук, проф. Ш.М. Рахимбаев (г. Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова); д-р хим. наук, проф. Г.В. Славинская (г. Воронеж, ВГТУ); д-р техн. наук, проф. Г.С. Славчева (г. Воронеж, ВГТУ), д-р физ.-мат. наук, проф. О.В. Стогней (г. Воронеж, ВГТУ); д-р техн. наук, проф. А.А. Трещев (г. Тула, ТулГУ); д-р техн. наук, проф. У.М. Турдиалиев (Республика Узбекистан, АндМИ), проф. О.Л. Фиговский (Haifa, Israel, IPAO), д-р техн. наук, проф. О.Н. Филимонова (г. Воронеж, ВГУИТ), д-р техн. наук Н.В. Шелехова (г. Москва, ВНИИПБТ), д-р техн. наук, проф. Е.С. Шинкевич (г. Одесса, Одесский архитектурно-строительный университет, Украина), д-р физ.-мат. наук, проф. М.В. Шитикова (г. Воронеж, ВГТУ).

В издании публикуются результаты научных исследований и производственного опыта сотрудников ВГТУ и других образовательных, научных, научно-производственных организаций по проблемам химии, физики и механики строительных и технических материалов; химической технологии и физико-химических методов диагностики, контроля качества и безопасности материалов, применяющихся в строительстве и технике; по техносферной безопасности.

Издание рекомендуется специалистам по промышленному и гражданскому строительству, материаловедцам, технологам, инженерам, научным сотрудникам, преподавателям, аспирантам и студентам архитектурно-строительных и технических учебных заведений.

Перепечатка материалов журнала допускается только с разрешения редакции.

Дизайн обложки Н.И. Мироненко

#### **АДРЕС РЕДАКЦИИ**

394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, ком. 6419  
тел.: (473) 2369350, (473)2717617  
E-mail: chemistry@vgasu.vrn.ru, lgkkn@rambler.ru

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

**Рахимбаев Ш.М., Аниканова Т.В., Погромский А.С.**

Кинетические константы твердения цемента..... 4

**Моргун Л.В., Нагорский В.В., Малова П.А.**

К вопросу о причинах обретенной агрегативной устойчивости пенобетонными смесями..... 15

**Усачев А.М., Рыкова К.А.**

Оценка качества сухих строительных смесей для упрочнения полов..... 26

**Золотухин С.Н., Сафионов И.Р., Винокуров И.В., Садыков С.О., Иващенко Е.И.**

Особенности зол уноса в качестве наполнителей в полимербетонных конструкциях..... 42

**Белов В.В., Баркая Т.Р., Куляев П.В.**

Ползучесть мелкозернистых карбонатных бетонов с комплексной добавкой..... 63

**Петропавловская В.Б., Завадько М.Ю., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С.,**

**Бурьянов А.Ф.**

Проектирование составов гипсовых сырьевых смесей, модифицированных добавками техногенного происхождения на основе местной сырьевой базы..... 77

**СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА**

**Хошимова Ф.Ф., Поликутин А.Э., Панфилов Д.В., Назаренко Н.Г.**

Экспериментальное и расчётное исследование ленты из углеродного волокна для внешнего армирования деревянных мостовых брусьев..... 92

**ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЬ. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ**

**Шелехова Н.В., Рудаков О.Б., Полянский К.К., Рудаков Я.О.**

Аппаратурное оформление методов газовой хроматографии и капиллярного электрофореза..... 106

**Рудаков Я.О., Мохамед Аббуд, Рудаков О.Б., Рудакова Л.В., Букиша М.С.**

Применение смартфона для контроля цветных чисел растительных масел во внелабораторных условиях..... 122

**МЕМБРАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

**Лазарев С.И., Шестаков К.В., Хохлов П.А., Полянский К.К., Лазарев Д.С.**

Исследование электродиффузионной проницаемости ацетатцеллюлозной мембраны МГА-95 при разделении растворов, содержащих катионы никеля (II)..... 131

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ**

**Разиньков Н.Д., Овчинникова Т.В., Винокурова И.М., Полянская Н.С.**

Воронежское водохранилище: о необходимости активного управления гидрологической природно-технической системой..... 137

**ПЕРСОНАЛИИ**

**Проскурин Д.К., Панфилов Д.В., Рудаков О.Б.**

К Юбилею Козлова Владимира Анатольевича..... 146

**Рудаков О.Б., Полянский К.К., Хорохордин А.М.**

Юбилей Шелеховой Натальи Викторовны..... 149

УДК 666.94

## КИНЕТИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ ТВЕРДЕНИЯ ЦЕМЕНТА

*Ш.М. Рахимбаев, Т.В. Аниканова\*, А.С. Погромский*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,  
Российская Федерация, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46*

*\*Адрес для переписки: Аниканова Татьяна Викторовна,*

*E-mail: anik.tv@yandex.ru*

Работа посвящена исследованию зависимости между содержанием отдельных клинкерных минералов, пределом прочности при сжатии камня из них в различные сроки твердения и кинетических констант твердения вяжущих. Рассмотрены закономерности в твердении цементов различного минералогического состава. Показано, что  $C_3S$  и  $C_2S$  по-разному влияют на кинетические константы твердения цементов. В поздние сроки наблюдается положительное влияние  $C_2S$  на предел прочности при сжатии и резкое снижение зависимости предела прочности камня от  $C_3S$ . Установлено, что в высокоалитовом цементе начальная скорость твердения резко возрастает с увеличением содержания  $C_3A$  от 5 до 12%. В низкоалитовом цементе увеличение содержания  $C_3A$  до 12% слабо влияет на величину начальной скорости твердения.

*Ключевые слова: клинкерные минералы, предел прочности при сжатии, теория переноса, начальная скорость, коэффициент торможения*

## KINETIC CONSTANTS OF CEMENT HARDENING

*Sh.M. Rakhimbayev, T.V. Anikanova\*, A.S. Pogromskiy*

*\*Corresponding author: Tatiana Anikanova, E-mail: anik.tv@yandex.ru*

The work is devoted to the study of the relationship between the content of individual clinker minerals, the compressive strength of a stone made of them at various times of hardening and the kinetic constants of hardening of binders. The regularities in the hardening of cements of various mineralogical composition are considered. It is shown that  $C_3S$  and  $C_2S$  have different effects on the kinetic constants of cement hardening. At a later date, there is a positive effect of  $C_2S$  on the compressive strength and a sharp decrease in the dependence of the ultimate strength of the stone on  $C_3S$ . It was found that in high-alite cement, the initial hardening rate increases sharply with an increase in the  $C_3A$  content from 5 to 12%. In low-alite cement, an increase in the  $C_3A$  content to 12% has little effect on the value of the initial hardening rate.

***Keywords:** clinker minerals, compressive strength, transfer theory, initial rate, braking coefficient*

**Введение.** Исследование кинетики твердения цементного камня материалами производится в основном для модифицированных различными добавками систем [1-6]. Отдельно влияние клинкерных минералов на прочностные характеристики цементного камня рассмотрено в работах [7, 8]. На основе результатов экспериментальных исследований авторов [7] установлена линейная зависимость между изменениями изобарно-изотермического потенциала 17-ти цементов различного состава и пределом прочности цементного камня при сжатии.

Этот вопрос с использованием клинкеров почти всех заводов страны также был рассмотрен в работе [8]. В данной работе исследованы зависимости между содержанием отдельных клинкерных минералов, пределом прочности при сжатии камня из них в различные сроки твердения и кинетических констант твердения вяжущих [9, 10].

**Основная часть.** Зависимость между прочностными показателями портландцементных клинкеров различного химико-минералогического состава, при сроках твердения от суток до года приведены работе [7]. Рассмотрим зависимости между содержанием отдельных клинкерных минералов, пределом прочности при сжатии камня из них в различные сроки твердения

Влияние содержания  $C_3S$  и  $C_2S$  на предел прочности при сжатии в возрасте 7 и 365 суток приведены на рис. 1 и 2.

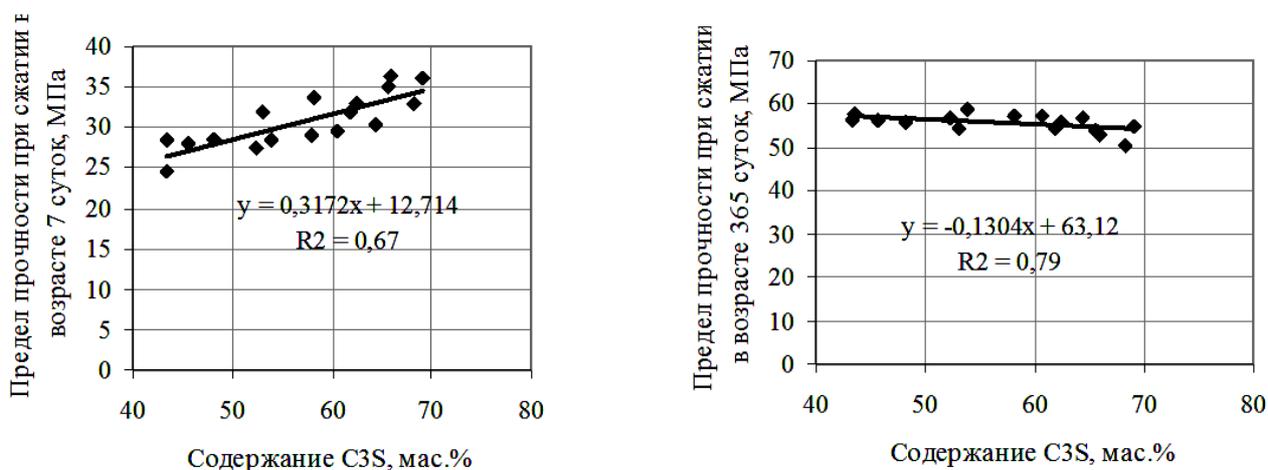


Рис. 1. Зависимость предела прочности при сжатии от содержания  $C_3S$ :  
*a* – в возрасте 7 суток, *б* – в возрасте 365 суток

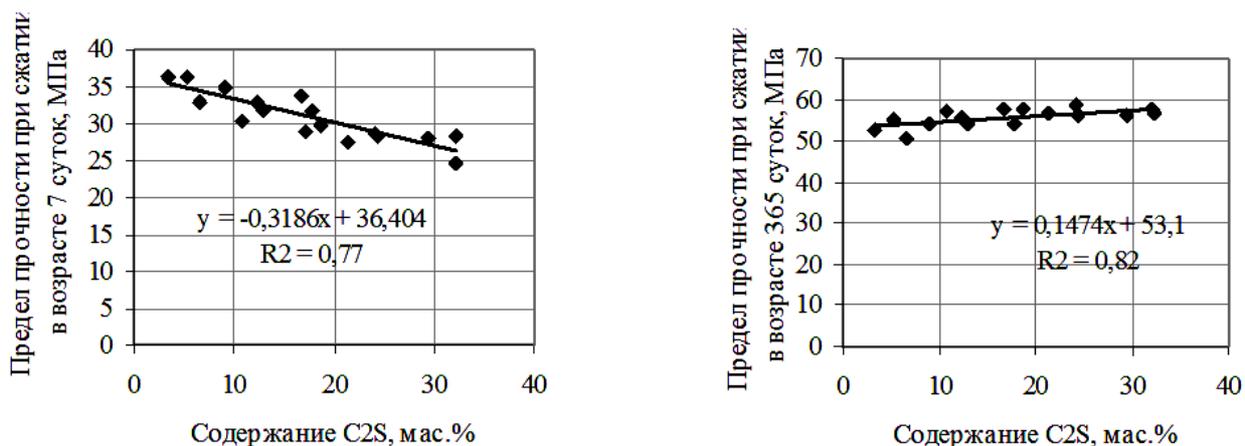


Рис. 2. Зависимость предела прочности при сжатии от содержания  $C_2S$ :  
*a* – в возрасте 7 суток, *б* – в возрасте 365 суток

Из данных, приведенных на рис. 1 и 2, видно, что  $C_3S$  и  $C_2S$  по-разному влияют на предел прочности при сжатии в ранние и в отдаленные сроки. Так в

возрасте 7 суток наблюдается прямолинейная зависимость предела прочности при сжатии от содержания  $C_3S$  и обратно пропорциональная – от содержания  $C_2S$ .

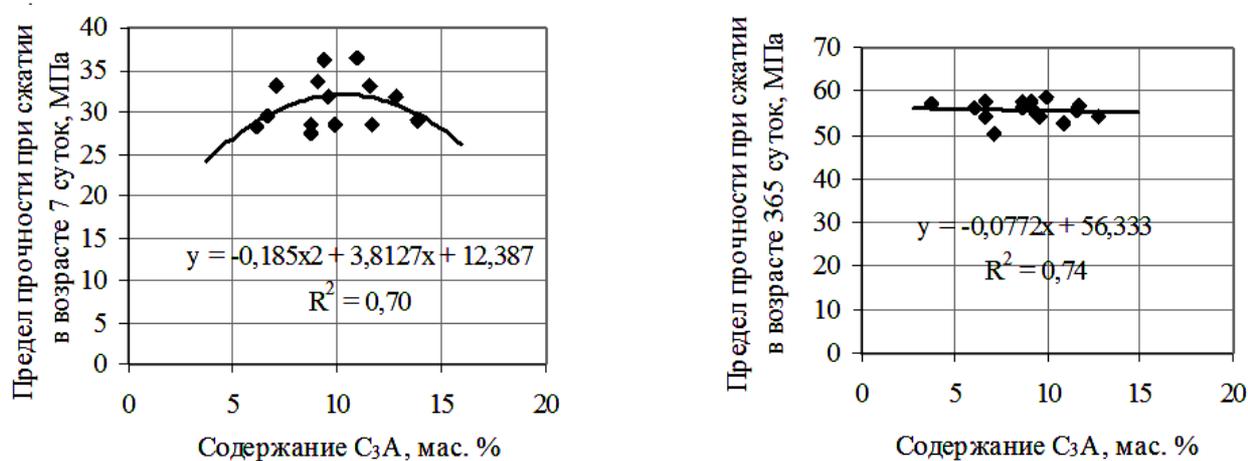


Рис. 3. Зависимость предела прочности при сжатии от содержания  $C_3A$ :  
 а – в возрасте 7 суток, б – в возрасте 365 суток

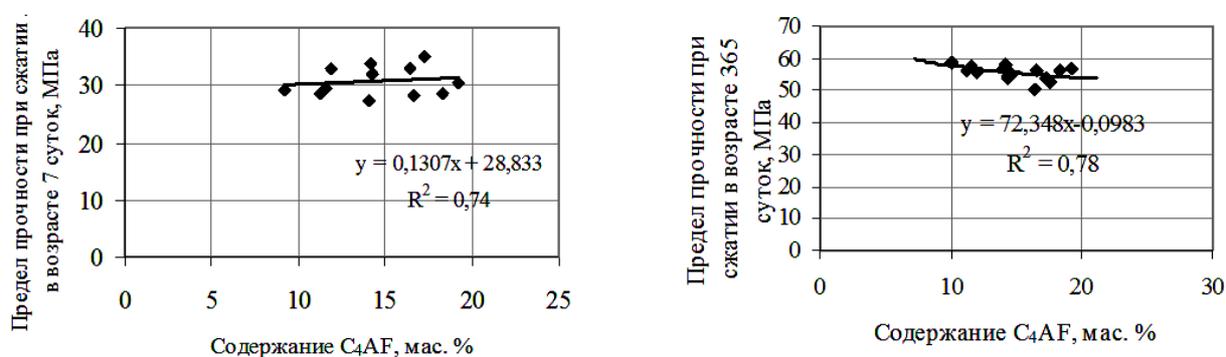


Рис. 4. Зависимость предела прочности при сжатии от содержания  $C_4AF$ :  
 а – в возрасте 7 суток, б – в возрасте 365 суток

Из данных, приведенных на рис. 3 и 4, видно, что в возрасте 7 суток оптимальное содержание  $C_3A$  составляет 10-12%, что согласуется с данными Ю.М. Бутга и В.В. Тимашева [8]. К годовичному сроку твердения влияние  $C_3A$  на прочность камня при сжатии практически сходит на нет. Это объясняется тем, что к этому сроку весь содержащийся в цементе  $C_3A$  успевает прогидратироваться.

Из рис. 4 а следует, что содержание  $C_4AF$  в пределах 10-20% практически не влияет на предел прочности камня при сжатии. При сроке твердения 1 год наблюдается небольшой спад прочности цементного камня при увеличении содержания  $C_4AF$  с 10 до 20% (рис. 4 б).

Известно, что большинство твердофазовых реакций в основной своей стадии находятся под внутренним диффузионным контролем [9]. Их скорость, имея максимальное значение в начале реакции, постоянно падает вплоть до нуля после завершения процесса [9, 10]. Так как взаимосвязь между термодинамическим эффектом реакции и кинетическими константами слабо изучена, рассмотрим этот вопрос более подробно.

Для этого авторы предлагают использовать уравнение кинетики гетерогенных реакций, основанное на теории переноса [10]:

$$\alpha = \frac{U_0 \tau}{1 + \kappa U_0 \tau}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – предел прочности при сжатии, МПа;  $\tau$  – продолжительность твердения, сут.;  $U_0 = (\alpha/\tau)_0$  – начальная скорость процесса, МПа/сут.;  $\kappa$  – коэффициент торможения процесса, МПа<sup>-1</sup>. Исходные предпосылки при выводе этого уравнения, а также обсуждения физического смысла входящих в него величин приведены в [9, 10]. В этом уравнении величина  $(\alpha/\tau)_0$  характеризует начальную скорость процесса твердения  $U_0$ , которая отражает физико-химическое сродство компонентов процесса, поэтому связана с кинетическим контролем реакции и не зависит от его диффузионных характеристик. Коэффициент торможения, наоборот, отражает степень замедления реакции во времени, находящейся под внутренним диффузионным контролем.

Бал выполнен расчет кинетических констант цементов различного состава по уравнению 1. Представим графически зависимость начальной скорости и коэффициента торможения от содержания клинкерных минералов.

Зависимость начальной скорости и коэффициента торможения от содержания  $C_3S$  и  $C_2S$  приведены на рис. 5, 6.

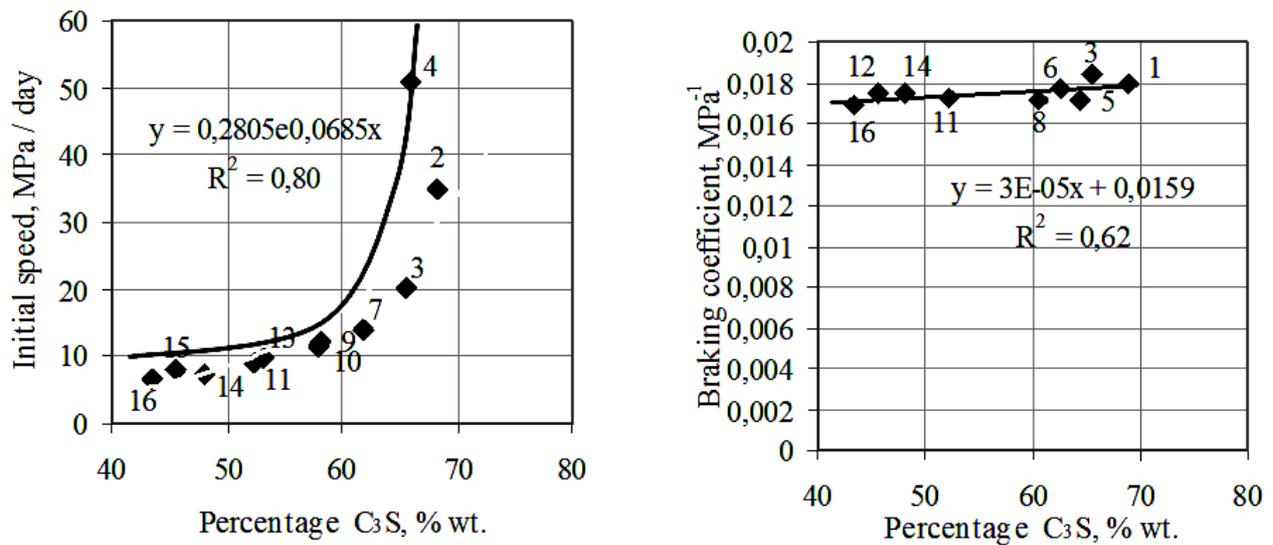


Рис. 5. Зависимость кинетических констант от содержания  $C_3S$ :  
 а – начальной скорости; б – коэффициента торможения

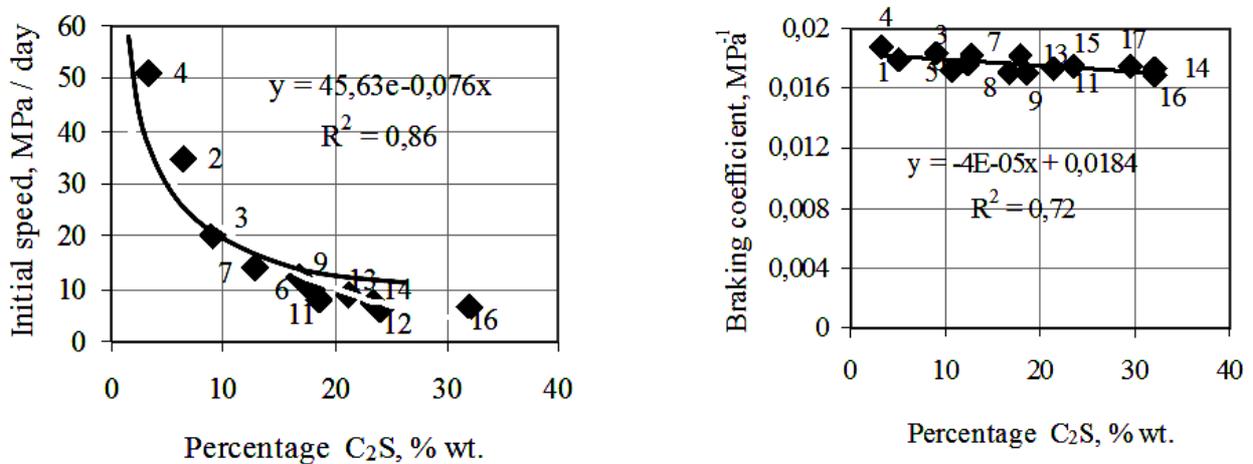


Рис. 6. Зависимость кинетических констант от содержания  $C_2S$ :  
 а – начальной скорости; б – коэффициента торможения

Из графиков, представленных на рис. 5 и 6, видно, что зависимость между начальной скоростью твердения и содержанием в цементе  $C_3S$  и  $C_2S$  достаточно хорошо описывается уравнением  $U_0 = k \cdot e^c$ , где знак перед степенью  $c$  положительный для  $C_3S$  и отрицательный для  $C_2S$ . Между коэффициентом торможения и содержанием в цементе  $C_3S$  и  $C_2S$  наблюдается линейная зависимость.

Зависимость кинетических констант от содержания  $C_3A$  и  $C_4AF$  представлена на рис. 7, 8.

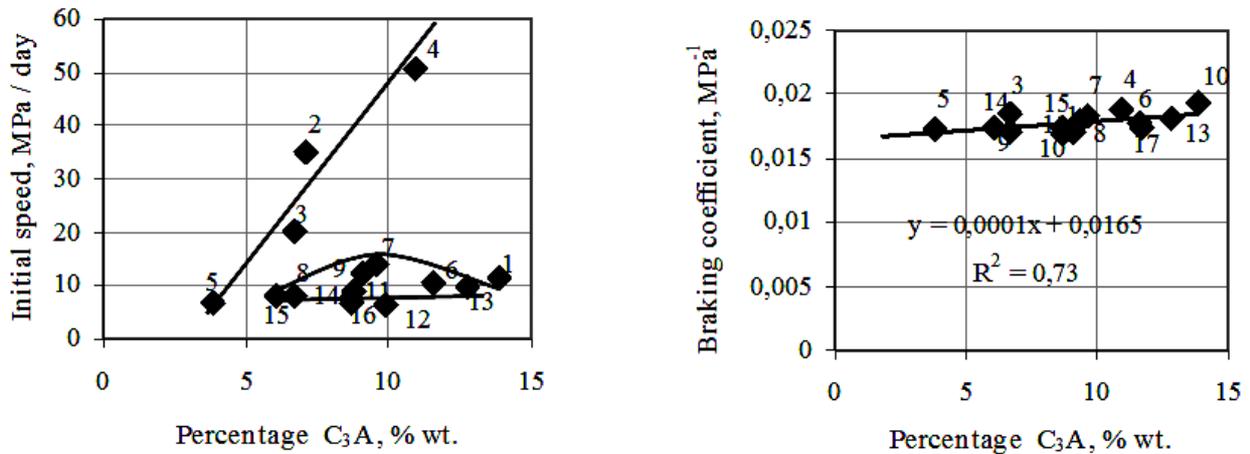


Рис. 7. Зависимость кинетических констант от содержания  $C_3A$ :  
 а – начальной скорости; б – коэффициента торможения

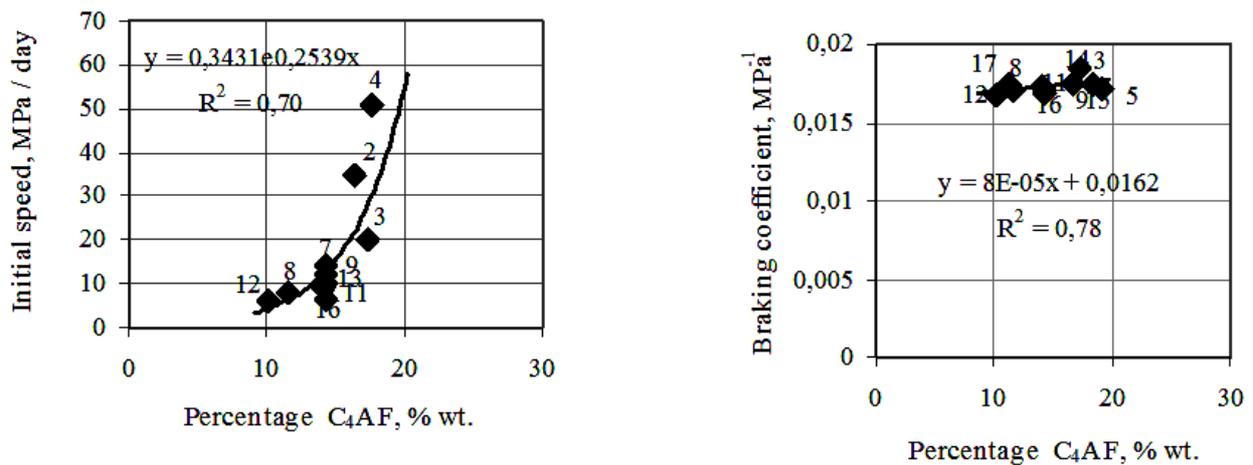


Рис. 8. Зависимость кинетических констант от содержания  $C_4AF$ :  
 а – начальной скорости; б – коэффициента торможения

Из рис. 7а видно, что в высокоалитовом цементе ( $C_3S = 56 - 68\%$ ) начальная скорость твердения резко возрастает с увеличением содержания  $C_3A$  от 5 до 12%. В низкоалитовом цементе ( $C_3S = 43 - 53\%$ ) увеличение содержания  $C_3A$  в этих пределах слабо влияет на величину начальной скорости. Экстремальная зависимость  $U_0$  от содержания  $C_3A$  наблюдается лишь у цемента со средним содержанием алита 58 - 61%. В цементе с содержанием  $C_3S$  43 - 53% увеличе-

ние содержания  $C_3A$  от 5 до 12% практически не влияет на начальную скорость твердения и прочность камня в ранние сроки.

**Заключение.** Показано, что  $C_3S$  и  $C_2S$  по-разному влияют на кинетические константы твердения цементов в ранние и в отдаленные сроки. В возрасте 7 суток наблюдается прямолинейная зависимость предела прочности при сжатии от содержания  $C_3S$  и обратно пропорциональная – от содержания  $C_2S$ .

В поздние сроки (1 год) наблюдается положительное влияние  $C_2S$  на предел прочности при сжатии и резкое снижение зависимости предела прочности камня от содержания  $C_3S$ . При этом предел прочности камня после 1 года твердения незначительно снижается с ростом содержания алита.

Влияние  $C_3A$  на предел прочности в возрасте 7 суток носит экстремальный характер: при увеличении его содержания от 5 до 12 % прочность растет, а при росте содержания  $C_3A$  свыше 13% – падает. В возрасте 1-го года содержание этого минерала практически не влияет на прочность цементного камня, что согласуется с экспериментальными данными по кинетике гидратации этого минерала.

В возрасте семи суток содержание  $C_4AF$  практически не влияет на прочность цементного камня. В возрасте 1-го года наблюдается незначительное снижение прочности при повышении содержания  $C_4AF$  до 15 - 20%.

Зависимость между начальной скоростью реакции твердения и содержанием в цементе  $C_3S$  и  $C_2S$  достаточно хорошо описывается уравнением  $U_0 = k \cdot e^c$ , где знак перед  $c$  положительный для  $C_3S$  и отрицательный для  $C_2S$ .

Между коэффициентом торможения и содержанием в цементе  $C_3S$  и  $C_2S$  наблюдается линейная зависимость.

Начальная скорость твердения цементов и прочность в ранние сроки существенно возрастают при увеличении содержания  $C_3A$  у высокоалитовых цементов, а у низкоалитовых – мало зависят от содержания  $C_3A$ . Так как с увеличением содержания алита от 45 до 68% и  $C_3A$  в пределах 5 - 10% начальная скорость твердения цементов и коэффициент торможения растут, а наибольшее влияние на прочность камня эти минералы оказывают в возрасте 7 - 28 суток. К 1 году и позднее прочность цементов различных составов сближается.

**Список литературы**

1. Кривобородов Ю.В., Еленина А.А. Твердение цементного камня с микродисперсными добавками // Техника и технология силикатов. 2015. Т.22. №4. С. 18-20.
2. Шепеленко Т.С., Горленко Н.П., Зубкова О.А. Процессы структурообразования цементных композитов, модифицированных добавками электролитов // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 5. С. 125-134.
3. Timoshenko T.I., Zalogina A.V., Khudasov V.I. Influence of ZnO and BaSO<sub>4</sub> additives on construction and technical properties of the weak base white cements // Construction Materials and Products. 2018. Volume 1. Issue 3. P. 17-24.
4. Кузнецова Т.В., Нефедьев А.П., Коссов Д.Ю. Кинетика гидратации и свойства цемента с добавкой метаксаолина // Строительные материалы. 2015. №7. С. 3-4.
5. Richardson I.G. The calcium silicate hydrates // Cement and Concrete Research. 2008. №38. P. 137-158.
6. Klassen V.K., Morozova I.A., Borisov I.N., Mandrikova O.S. Energy saving and increasing the strength of cement using steel slag a raw material component // Middle East Journal of Scientific Research. 2013. Т. 18. № 11. С. 1597-1601.
7. Егоров Г.В., Капралова Р.М., Чибисов Н.П., Ермаков Г.Ф. Сопоставление прочностных показателей с изобарно-изотермическими потенциалами гидратации портландцементных клинкеров // Цемент, 1987. №8. С. 10-11.
8. Бутт Ю.М., Тимашев В.В. Влияние фазового состава портландцементных клинкеров на вяжущие свойства цементов // Труды НИИ Цемент. М.: Госстройиздат, 1962. Вып. 17. С 85-121.
9. Рахимбаев Ш.М. Кинетика переноса в гетерогенных процессах технологий строительных материалов // Сб. научн. трудов Физико, химия строительных и композиционных материалов. Белгород: Изд-во БТИСМ, 1989. С. 160-164.
10. Рахимбаев Ш.М. Расчет констант скорости некоторых процессов технологии искусственных конгломератов // Сб. научн. трудов Проблемы материала-

ловедения и совершенствование технологии производства строительных изделий. Белгород: Изд-во БТИСМ, 1990. С. 42-46.

### References

1. Krivoborodov Yu.V., Zelenina A.A. Hardening of cement stone with micro-disperse additives // *Technique and technology of silicates*. 2015. Vol.22. No. 4. P. 18-20.

2. Shepelenko T.S., Gorlenko N.P., Zubkova O.A. Processes of structure formation of cement composites modified with electrolyte additives // *Civil Engineering magazine*. 2018. No.5. P. 125-134.

3. Timoshenko T.I., Zalogina A.V., Khudasov V.I. Influence of ZnO and BaSO<sub>4</sub> additives on construction and technical properties of the weak base white cements // *Construction Materials and Products*. 2018. Volume 1. Issue 3. P. 17-24.

4. Kuznetsova T.V., Nefediev A.P., Kosov D.Yu. Hydration kinetics and properties of cement with metakaolin additive // *Building materials*. 2015. No. 7. P. 3-4.

5. Richardson I.G. The calcium silicate hydrates // *Cement and Concrete Research*. 2008. №38. P. 137-158.

6. Klassen V.K., Morozova I.A., Borisov I.N., Mandrikova O.S. Energy saving and increasing the strength of cement using steel slag a raw material component // *Middle East Journal of Scientific Research*. 2013. T. 18. № 11. P. 1597-1601.

7. Egorov G.V., Kapralova R.M., Chibisov N.P., Ermakov G.F. Comparison of strength parameters with isobaric-isothermal potentials of Portland Cement clinkers hydration // *Cement*, 1987. No. 8. P. 10-11.

8. Butt Yu.M., Timashev V.V. Influence of the phase composition of Portland Cement clinkers on the binding properties of the cements // *Publishings of the Institute of the Cement*. M.: Gosstroizdat, 1962. Vol. 17. P. 85-121.

9. Rakhimbayev Sh.M. Transfer kinetics in heterogeneous processes of building materials technologies // *Collection of scientific works physico-chemistry of*

building and composite materials. Belgorod: Publishing House of BTISM, 1989. P. 160-164.

10. Rakhimbayev Sh.M. Calculation of the rate constants of some processes of artificial conglomerate technology // Collection of scientific works Problems of materials science and improvement of technology for the production of construction products. Belgorod: BTISM Publishing House, 1990. P. 42-46.

---

**Рахимбаев Шарк Матрасулович** – д-р техн. наук, проф. кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова

**Аниканова Татьяна Викторовна** – канд. техн. наук, доцент кафедры архитектурных конструкций Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова

**Погромский Алексей Сергеевич** – старший преподаватель кафедры автомобильных и железных дорог Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова

## **К ВОПРОСУ О ПРИЧИНАХ ОБРЕТЕНИЯ АГРЕГАТИВНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПЕНОБЕТОННЫМИ СМЕСЯМИ**

*Л.В. Моргун\*, В.В. Нагорский, П.А. Малова*

*Донской государственный технический университет,  
Российская Федерация, 344001, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1*

*\*Адрес для переписки: Моргун Любовь Васильевна,*

*E-mail: konst-lvm@yaandex.ru*

В статье отражена актуальность поиска технологических и рецептурных приемов, позволяющих улучшать эксплуатационные свойства пенобетонов. Выполнен научный анализ явлений массопереноса, имеющих место при формировании дисперсной газовой фазы в структуре пенобетонных смесей. Установлено, что процесс получения агрегативно-устойчивой дисперсной газовой фазы включает два этапа. На первом этапе наблюдается первичное воздухововлечение, характеризующееся крупными порами. На втором этапе происходит диспергация газовых пор, полученных на 1 этапе, в результате чего пеносмеси обретают агрегативную устойчивость. Научно обоснованные различия в газовых структурах получили экспериментальное подтверждение.

*Ключевые слова: пенобетонные смеси, агрегативная устойчивость, дисперсная газовая фаза*

## **ON THE QUESTION OF THE REASONS FOR THE ACQUISITION OF AGGREGATIVE STABILITY BY FOAM CONCRETE MIXTURES**

*L.V. Morgun \*, V.V. Nagorsky, P.A. Malova*

*Don State Technical University,  
Russian Federation, 344001, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1*

*\*Corresponding author: Morgun Lyubov Vasilyevna,*

*E-mail: konst-lvm@yaandex.ru*

The article reflects the relevance of the search for technological and prescription techniques to improve the performance properties of foam concrete. The scientific analysis of mass transfer phenomena occurring during the formation of a dispersed gas phase in the structure of foam concrete mixtures is carried out. It is established that the process of obtaining an aggregatively stable dispersed gas phase includes two stages. At the first stage, primary air intake is observed, characterized by large pores. At the second stage, the gas pores obtained at the 1st stage are dispersed, as a result of which the foam mixtures acquire aggregative stability. Scientifically based differences in gas structures have been experimentally confirmed.

**Keywords:** *foam concrete mixtures, aggregative stability, dispersed gas phase*

**Введение.** Ячеистые бетоны, практическое применение которых в XX веке позволило строительному комплексу достичь высокого уровня технико-экономической эффективности, продолжают оставаться важными стеновыми и изоляционными материалами [1-3], способствующими повышению безопасности строительных объектов. Современная стройиндустрия поставляет на строительный рынок мелкоштучные изделия из автоклавного газосиликата и более обширную номенклатуру изделий из неавтоклавного пенобетона, преимущественно дисперсно армированного синтетическими волокнами [4-6].

Высокая трещиностойкость изделий из фибропенобетона (ФПБ) по сравнению с автоклавным газосиликатом обеспечивает отсутствие потерь при транспортировании и монтаже. Однако технологические проблемы производства изделий из ФПБ продолжают оставаться острыми. К важнейшим из них следует отнести агрегативную устойчивость на этапе преобладания вязких связей между дисперсными частицами смесей. До настоящего времени практически отсутствуют научно обоснованные количественные закономерности, опираясь на которые можно было бы прогнозировать меру агрегативной устойчивости пенобетонных смесей в период фазового перехода «из вязкого в твердое».

**Постановка задачи.** Для получения пено- и фибропенобетонов высокого качества необходимо, чтобы при прочих равных условиях, их газовая пористость обладала высокой дисперсностью и равномерностью распределения по объему [7-9]. В работах, посвященных проблемам прочности газонаполненных бетонов, утверждается необходимость обеспечения мелкопористых структур, однако не дается методических рекомендаций для их достижения. Для того чтобы приблизиться к пониманию причинно-следственных связей формирования мелкопористых структур рассмотрим особенности массопереноса, развивающегося в пенобетонных смесях в период гомогенизации сырьевых компонентов в турбулентном смесителе.

При этом важно учитывать, что готовые пенобетонные смеси состоят из дисперсионной среды в виде слабого водного раствора ПАВ и дисперсной фазы – твердых и газовые частиц, упакованных в пенные пленки. Твердые частицы обладают удельной поверхностью порядка  $1 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{м}^3$  [10]. Размеры дисперсных частиц воздуха находятся в диапазоне  $1 \cdot 10^{-3} \dots 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  [11], т.е. от 1 мм до 4 мкм. Жидкая фаза в пенобетонных смесях состоит из воды и растворенных в ней поверхностно-активных веществ (ПАВ). Большая часть ПАВ размещается в водных пленках вокруг газовых включений, а меньшая - в межчастичном пространстве. Однако между ними всегда существует подвижное соответствие [12, 13], обретаемое в момент завершения процесса перемешивания и способное изменяться в ходе отвердевания дисперсной системы.

Наблюдение за динамикой изменения объема при изготовлении газонаполненной смеси в турбулентном смесителе позволило установить, что основная часть дисперсной газовой фазы размещается в цементно-песчаном шликерев течение 1...1,5 минут скоростного смешивания компонентов сырья. Если ограничиться этим промежутком времени и завершить перемешивание, то приготовленные смеси очень быстро утрачивают агрегативную устойчивость. Вовлеченная дисперсная газовая фаза почти полностью покидает приготовленную смесь в течение незначительного для фазового перехода «из вязкого в твердое» промежутка времени. Наблюдения показали, что, несмотря на высокий объем

воздухововлечения, сформировавшаяся в смесителе структура не способна обладать агрегативной устойчивостью. В то же время практика показывает, что продолжение перемешивания может приводить к получению агрегативно-устойчивых пеносмесей.

Если учесть [12-14] фундаментальную закономерность между размером газовых включений и скоростью их утраты в любых суспензиях, то следует полагать, что в первые минуты воздухововлечения в колбе бетоносмесителя образуется крупнопористая структура пенобетонных смесей. Причиной для этого утверждения является тот факт, что молекулы ПАВ, будучи волокнистыми по форме и полярно заряженными [12], способны под действием сдвигающих напряжений, развивающихся в дисперсионной среде в результате движения рабочего органа смесителя, своей гидрофобной частью физически связывать некоторые порции воздуха, а гидрофильной – часть воды затворения. Таким образом, при перемешивании в объем сырьевой смеси вовлекается дисперсная газовая фаза. Устойчивость её в структуре смеси будет зависеть от соотношения между вязкостью дисперсионной среды (цементно-песчаного шликера) и величиной выталкивающей силы, развиваемой газовыми пузырьками, упакованными в пенные пленки [15].

Следовательно, надо полагать, что в начальный период перемешивания формируются крупные газовые пузырьки потому, что в пенобетонной смеси содержится значительное количество свободной воды затворения, которая легко физически связывается молекулами ПАВ в структурах пенных пленок. Сопротивление воды затворения, перемещению стержнеобразных молекул на границу раздела фаз «газ-жидкость» в этот период невелико, потому что в результате слоистого их расположения в ней существует ориентационный дальний порядок. При наличии ориентационного дальнего порядка в водных растворах ПАВ вязкость жидкости понижена именно в плоскостях расположения молекул [12]. Поэтому большое число молекул ПАВ практически одновременно оказывается в энергетически неоднородной области на границе раздела «газ-жидкость», что

и позволяет им заключать вовнутрь пенных пленок газовые объемы крупных размеров.

Образование первичной газонаполненной структуры в перемешиваемой смеси должно приводить к росту её вязкости из-за перемещения части молекул ПАВ из воды в пенные пленки. Повышение вязкости, обусловленное переводом части воды затворения из свободного в физически связанное пенными пленками состояние, способствует повышению только седиментационной устойчивости пенобетонной смеси потому, что выталкивающая сила, развивающаяся в результате образования крупных газовых пор, создает энергетические предпосылки для нарушения агрегативной устойчивости.

Из теории жидких кристаллов следует, что молекулярные силы, обеспечивающие упорядоченную сферическую структуру в крупных пенных пленках малы [12-14]. Поэтому жидкие кристаллы легко изменяют структуру под действием различных внешних факторов (температуры, давления, сдвиговых воздействий рабочего органа смесителя и т. д.), что приводит к изменению их размеров. Именно перечисленные индивидуальные особенности ПАВ в ходе продолжающегося перемешивания позволяют обеспечивать дополнительную диспергацию газовых включений и создавать структурно устойчивые смеси, в которых электростатических сил оказывается достаточно для сохранения вовлеченной дисперсной газовой фазы в течение времени необходимого для её перехода «из вязкого в твердое».

Вот почему раннее завершение процессов перемешивания может приводить к утрате агрегативной устойчивости пеносмесей даже в тех случаях, когда их рецептура оптимальна. Следовательно, несмотря на то, что энергии стержнеобразных молекул пенообразователя достаточно для вовлечения большого объема воздуха, мера дисперсности газовых включений на начальном этапе перемешивания недостаточна для того, чтобы электростатических сил, развивающихся в пленках жидкой фазы, хватало для её удержания.

Теоретический анализ особенностей массопереноса в случае продолжения процесса перемешивания показал, что он необходим для диспергации пор-

ций воздуха, ранее захваченных молекулами ПАВ. Под действием сил сдвига, развивающихся в колбе бетоносмесителя за счет вращения рабочего органа, ранее сформированные крупные пенные пленки расположенные внутри цементно-песчаного шликера, вынуждены разрушаться. Вязкость перемешиваемой смеси на этом этапе уже достаточна, велика, и измельченные порции грубодисперсной газовой фазы не успевают покидать объем шликера потому, что оказываются заключенными во вновь образованные пенные пленки, сформированные за счет отбора молекул ПАВ из межчастичной жидкости. Суммарная поверхность раздела фаз «газ-жидкость» возрастает и, в соответствии с ним, должна увеличиваться агрегативная устойчивость пенобетонной смеси.

Кроме того, уменьшение количества ПАВ в межчастичной жидкости закономерно ведет к повышению её вязкости, а рост дисперсности вовлеченной газовой фазы гарантированно понижает величину выталкивающих сил. Перечисленные взаимно конкурирующие процессы массопереноса теоретически способны приводить к обретению агрегативной устойчивости пенобетонных смесей.

**Результаты и обсуждение.** Для оценки достоверности изложенных положений был выполнен следующий эксперимент. В лабораторном турбулентном смесителе при скорости вращения рабочего органа 750 об/мин готовились пенобетонные смеси марок D500 и D700 при соотношениях «цемент: заполнитель» =1:1. Поскольку процесс воздухо насыщения смесей начинается после введения пенообразователя, то через контрольные промежутки времени фиксировали;

- объемы, получаемых смесей по высоте столба смеси в бетоносмесителе;
- среднюю плотность по ГОСТ 7473-2010;
- меру агрегативной устойчивости по величине времени, в течение которого имело место расслоение или величине осадки смеси при твердении, если визуально расслоение зафиксировать не удалось. Полученные результаты представлены в таблице.

Из анализа данных представленных в таблице следует, что перемешивание сырья в турбулентном смесителе в течение 2...2,5 минут, не смотря на

обильное воздухововлечение, практически не позволяет получать устойчивые пенобетонные смеси. После завершения перемешивания вовлеченная дисперсная газовая фаза практически полностью покидает смеси и их плотность возвращается к величинам, установленным до начала воздухововлечения.

Время перемешивания, с	Свойства смесей проектных марок пенобетонов							
	D500				D700			
	V, л	$\rho_0$ , г/л	Период расслоения, мин	Осадка бетона, %	V, л	$\rho_0$ , г/л	Период расслоения, мин	Осадка бетона, %
0	17,0	1880			11,4	1990		
30	14,6	1610	1,5		10,9	1940	2,5	
60	24,0	902	5,0		18,1	1215	11,0	
90	25,3	851	11,5		20,4	1080	26,0	
120	27,3	800	18,0		22,0	992	35,0	
150	28,0	780	37,5		23,1	949	-	11,6
180	30,1	735	-	12,3	23,4	928	-	1,4
240	30,2	730	-	1,7	23,7	910	-	0,7
300	30,2	729	-	1,1	23,8	907	-	0,3
360	30,3	727	-	0,7	23,9	901	-	0
420	30,3	725	-	0,5	23,9	903	-	0
480	30,3	727	-	0	23,9	901	-	0
540	30,3	725	-	0	-		-	-

Примечания: V – объем смеси в литрах;  $\rho_0$  – средняя плотность смеси в кг/м<sup>3</sup>.

Более длительный период гомогенизации сырья, с одной стороны, весьма незначительно влияет на величину плотности смесей, она снижается всего на доли процента. А с другой стороны, постепенно приводит к появлению агрегативно-устойчивых смесей (табл.). Следовательно, для достижения агрегативной устойчивости пенобетонных смесей чрезвычайно важно обеспечивать такую продолжительность гомогенизации сырья, которая позволяет стержнеобразным молекулам ПАВ выполнять следующую работу:

- вовлекать дисперсную газовую фазу;
- диспергировать эту фазу до уровня, обеспечивающего равномерность и устойчивость её распределения в объеме пенобетонной смеси.

**Выводы.** Детальный научный анализ процесса воздухововлечения при изготовлении пенобетонных смесей по одностадийной технологии позволил предположить, что ПАВ, слоисто располагающиеся в жидкой фазе смесей, на начальном этапе их перемешивания способны активно вовлекать крупные порции воздуха. Крупные газовые включения после прекращения перемешивания не могут сохраняться в структурах, прочность которых определяется только силами капиллярного стяжения воды. Поскольку пенные пленки, удерживающие вовлеченный воздух внутри смеси, легко изменяют форму и размеры под действием сдвиговых напряжений, возникающих в колбе смесителя в результате вращения его рабочего органа, то увеличение продолжительности перемешивания будет способствовать:

- уменьшению среднего радиуса газовых пор, при сохранении общего объема вовлеченного воздуха;
- обретению смесями агрегативной устойчивости.

Выполненные экспериментальные исследования подтвердили адекватность научных рассуждений и показали, что для получения агрегативно-устойчивых пенобетонных смесей, изготавливаемых по одностадийной технологии, продолжительность гомогенизации сырья после введения пенообразователя должна составлять не менее 6 минут.

### **Список литературы**

1. Хозин В.Г. Роль стройиндустрии в становлении циркулярной экономики промышленных регионов России/ В.Г. Хозин, В.Ф. Хританков, А.П. Пичугин // Строительные материалы, 2021, № 1-2. С. 6-12.
2. Ушеров-Маршак А.В. Современный бетон и его технологии/ [Электронный ресурс] - <http://agrotermal.ru/images/stat/32.pdf> (Дата обращения 04.02.2021).
3. Abbas Mohajerani, Siu-QunHui, Mehdi Mirzababaei, Arul Arulrajah, Suk-sun Horpibulsuk, Aeslina Abdul Kadir, Md Tareq Rahman, and Farshid Maghool. Amazing types, properties, and applications of fibres in construction materials. Materials. 2019. 12. 2513. DOI:10.3390 / ma12162513.

4. Гринфельд Г.И. Эксплуатационные характеристики автоклавного газобетона марки по средней плотности D400. Интернет-журнал «Строительство уникальных зданий и сооружений», 2013, №5 (10). С. 28-57.

5. Моргун Л.В. Практика применения изделий из фибропенобетона в Ростове-на-Дону / Л.В. Моргун, В.Н. Моргун, А.Ю. Богатина, К.И. Костыленко // Актуальные вопросы современного строительства промышленных регионов России: тр. II Всерос. науч.-практ. конф. С междунар. участием, Новокузнецк, 8-9 окт. 2019 г. / Сибирский гос. индустриал. ун-т. Новокузнецк: СГИУ, 2019. С. 119-122.

6. Шахова Л.Д. Технология пенобетона. Теория и практика. Монография. М.: Издательство АСВ. 2010. 248 с.

7. Шахова Л.Д. Некоторые аспекты исследований структурообразования ячеистых бетонов неавтоклавного твердения // Строительные материалы, 2003, №2. Приложение «Наука». С. 4-7.

8. Buryanov A., Petropavlovskaya V., Novichenkova T., Petropavlovskii K. Simulating the structure of gypsum composites using pulverized basalt waste. Matec Webof Conferences. 2017. P. 00026. DOI:10.1051/mateconf/201711700026.

9. Перцев В.Т. Пеноматериалы неавтоклавного твердения. Технология и применение / В.Т. Перцев, Т.Ф. Ткаченко// Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2012, № 5. С. 57-60.

10. Тихомиров В.К. Пены. М.: Химия. 1975. 264 с.

11. Перцев В.Т. Роль дисперсности и влажности в процессах структурообразования дисперсно-зернистых систем/ В.Т. Перцев, Е.И. Шмицько, П.А. Головинский // Изв. ВУЗов. Строительство, 1998. №6. С.45-50.

12. Блинов Л.М. Жидкие кристаллы: структура и свойства. М.: Либроком, 2013. 480 с.

13. Falliano D., Restuccia L., Gugliandolo E., «A simple optimized foam generator and a study on peculiar aspects concerning foams and foamed concrete», Construction and Building Materials, Vol. 268, 2021, P. 121-101.

14. Юров В.М. Толщина поверхностного слоя, поверхностная энергия и атомный объем элемента // В.М. Юров, С.А. Гученко, В.Ч. Лауринас. Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, 2018, Вып. 10. С. 691-699.

15. Волков В.А. Коллоидная химия. Поверхностные явления и дисперсные системы: Учебник. СПб.: Издательство «Лань», 2015. 672 с.

### References

1. Khozin V.G. The role of the construction industry in the formation of the circular economy of industrial regions of Russia/ V.G. Khozin, V.F. Hritankov, A.P. Pichugin // Construction Materials, 2021, No. 1-2. P. 6-12.

2. Usherov-Marshak A.V. Modern concrete and its technologies/ [Electronic resource] - <http://agrotermal.ru/images/stat/32.pdf> (Accessed 04.02.2021).

3. Abbas Mohajerani, Siu-QunHui, Mehdi Mirzababaei, Arul Arulrajah, Suk-sun Horpibulsuk, Aeslina Abdul Kadir, Md Tareq Rahman, and Farshid Maghool. Amazing types, properties, and applications of fibres in construction materials. Materials. 2019. 12. 2513. DOI:10.3390 / ma12162513.

4. Grinfeld G.I. Operational characteristics of autoclaved aerated concrete of the D400 grade according to average density. Online magazine «Construction of unique buildings and structures», 2013, №5 (10). P. 28-57.

5. Morgun L.V. The practice of using fibropen concrete products in Rostov-on-Don / L.V. Morgun, V.N. Morgun, A.Y. Bogatina, K.I. Kostylenko // Topical issues of modern construction of industrial regions of Russia: tr. II All-Russian Scientific and Practical Conference. From the international. participation, Novokuznetsk, 8-9 Oct. 2019 / Siberian State. industrial. un-T. Novokuznetsk: SGIU, 2019. P. 119-122.

6. Shakhova L.D. Foam concrete technology. Theory and practice. Monograph. M.: Publishing House ASV. 2010. 248 p.

7. Shakhova L.D. Some aspects of studies of the structure formation of cellular concretes of non-autoclave hardening // Building materials, 2003, No.2. Appendix «Science». P. 4-7.

8. Buryanov A., Petropavlovskaya V., Novichenkova T., Petropavlovskii K. Simulating the structure of gypsum composites using pulverized basalt waste. *Matec Web of Conferences*. 2017. P. 00026. DOI:10.1051/matecconf/201711700026.
9. Pertsev V.T. Foam materials of non-autoclave hardening. *Technology and application* / V.T. Pertsev, T.F. Tkachenko// *Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Physico-chemical problems and high technologies of building materials science*. 2012, No. 5. P. 57-60.
10. Tikhomirov V.K. *Foam*. M.: Chemistry. 1975. 264 p.
11. Pertsev V.T. The role of dispersion and humidity in the processes of structure formation of dispersed granular systems / V.T. Pertsev, E.I. Shmitko, P.A. Golovinsky P.A. // *Izv.universities. Construction*.1998, No.6. P. 45-50.
12. Blinov L.M. *Liquid crystals: structure and properties*. M.: Librocom, 2013. 480 p.
13. Falliano D., Restuccia L., Gugliandolo E., «A simple optimized foam generator and a study on peculiar aspects concerning foams and foamed concrete», *Construction and Building Materials*, Vol. 268, 2021, P. 121-101.
14. Yurov V.M. Thickness of the surface layer, surface energy and atomic volume of the element // V.M. Yurov, S.A. Guchenko, V.Ch. Laurinas. *Physico-chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*, 2018, Issue 10. P. 691-699.
15. Volkov V.A. *Colloidal chemistry. Surface phenomena and dispersed systems: Textbook*. St. Petersburg: PublishingHouse «Lan», 2015. 672 p.

---

**Моргун Любовь Васильевна** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Строительные материалы» Донского государственного технического университета

**Нагорский Виктор Владимирович** – аспирант кафедры «Строительные материалы» Донского государственного технического университета

**Малова Полина Александровна** – магистрант профиля «Инновационные материалы в современном строительстве» Донского государственного технического университета

УДК 691.3

## **ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ПОЛОВ**

*А.М. Усачев\*, К.А. Рыкова*

*Воронежский государственный технический университет,  
Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

*\*Адрес для переписки: Усачев Александр Михайлович,*

*E-mail: usachevam@vgasu.vrn.ru*

В статье показаны преимущества сухих строительных смесей по сравнению с обычными растворными смесями. Подробно рассмотрены напольные сухие смеси (топпинги), их классификация, состав, особенности применения. Представлены результаты экспериментальных исследований 21 разновидности топпинга как отечественного, так и зарубежного производства (Германия, Швеция, Швейцария, Австрия, Франция). Были определены основные физико-механические свойства всех рассмотренных топпингов, а именно, средняя плотность, прочность при сжатии и истираемость. Также для сравнения был определен минералогический состав нескольких партий сухих напольных смесей. Наибольшую прочность из всех изученных топпингов показал «MasterTop 450» немецкого концерна BASF – 75,5 МПа. Наилучшая истираемость принадлежит топпингу «MasterTop» (0,17 г/см<sup>2</sup>) того же производителя. Лучшими топпингами среди отечественных производителей являются «Planko Top 200» (ООО «ППС Трейд») и «Refloor» (ООО «Refloor»). Установлено, что прочность при сжатии образцов изготовленных из сухой смеси «Planko Top 200» в возрасте 28 суток составляет 71,8 МПа, «Refloor» - 74,9 МПа. Значение истираемости топпинга «Planko Top 200» составляет 0,32 г/см<sup>2</sup>, «Refloor» - 0,43 г/см<sup>2</sup>.

*Ключевые слова: сухие строительные смеси, топпинг, истираемость, прочность на сжатие, методика определения, физико-механические свойства*

## EVALUATION OF THE QUALITY OF DRY BUILDING MIXES FOR STRENGTHENING FLOORS

*A.M. Usachev\*, K.A. Rykova*

*Voronezh State Technical University,  
Russian Federation, 394006, Voronezh, ul. 20-letia Oktiabria, 84*

*\*Corresponding author: Alexander M. Usachev, E-mail: usachevam@vgasu.vrn.ru*

The article shows the advantages of dry building mixes in comparison with conventional mortar mixes. Floor dry mixes (toppings), their classification, composition, and application features are considered in detail. The results of experimental studies of 21 varieties of topping, both domestic and foreign production (Germany, Sweden, Switzerland, Austria, France) are presented. The basic physical and mechanical properties of all the considered toppings were determined, namely, average density, compressive strength and abrasion resistance. Also, for comparison, the mineralogical composition of several batches of dry floor mixes was determined. The greatest strength of all the studied toppings was shown by the «MasterTop 450» of the German concern BASF – 75,5 MPa. The best abrasion resistance belongs to the «MasterTop» topping (0,17 g/cm<sup>2</sup>) of the same manufacturer. The best toppings among domestic manufacturers are «Planko Top 200» (LLC «PPS Trade») and «Reffloor» (LLC «Reffloor»). It was found that the compressive strength of samples made from a dry mixture of «Planko Top 200» at the age of 28 days is 71,8 MPa, «Reffloor» - 74,9 MPa. The abrasion value of the topping «Planko Top 200» is 0,32 g/cm<sup>2</sup>, «Reffloor» is 0.43 g/cm<sup>2</sup>.

***Keywords:** dry building mixes, topping, abrasion resistance, compressive strength, determination method, physical and mechanical properties*

**Введение.** Применение сухих строительных смесей является одним из направлений технического прогресса в строительстве в последнее время. Их использование в строительной практике позволяет повысить качество работ благодаря заводскому изготовлению смесей, значительно сократить транспортные расходы, уменьшить количество отходов при выполнении работ, повысить производительность труда [1, 2].

Сухие строительные смеси – это многокомпонентные системы заводского изготовления, состоящие из минеральных вяжущих веществ, заполнителей с максимальной крупностью 1,25 мм и различных добавок (пластификаторов, стабилизаторов, водоудерживающих добавок, замедлителей и ускорителей твердения и др.) [1-4].

В соответствии с ГОСТ 31189-2015 [5] сухие строительные смеси классифицируют по следующим признакам:

- функциональному назначению;
- условиям применения;
- применяемому вяжущему;
- наибольшей крупности заполнителей (наполнителей);
- способу укладки и нанесения.

Основополагающей является классификация сухих строительных смесей по функциональному назначению, так как она отражает всё многообразие выпускаемых и используемых материалов. В соответствии с этой классификацией смеси по функциональному назначению подразделяются на следующие виды:

- 1) кладочные;
- 2) штукатурные;
- 3) шпаклевочные (выравнивающие и финишные);
- 4) клеевые;
- 5) затирочные (шовные);
- 6) напольные;
- 7) ремонтные;
- 8) изоляционные (гидроизоляционные, теплозвукоизоляционные);
- 9) специальные (защитные, реставрационные, saniрующие);
- 10) для фасадных теплоизоляционных композиционных систем с наружными штукатурными слоями [5].

Напольные сухие смеси, применяемые для упрочнения поверхностных слоев, получили название – топпинги. Топпинги подразделяют на типы по следующим классификационным признакам:

- по назначению (для устройства базовых толстослойных стяжек, выравнивающих слоев под покрытие; финишных покрытий);
- по способу укладки (выравниваемые и наливные);
- по плотности раствора (легкие и нормальные);
- по скорости твердения (нормально- и быстротвердеющие);
- по условиям применения (для наружных и внутренних работ) [6].

Широкое применение топпингов обусловлено свойствами бетона, который, как правило, не обладает высокой стойкостью к истирающим воздействиям. В процессе эксплуатации обычного бетонного пола верхний слой быстро изнашивается, начинается усиленное пылеотделение, в самом бетоне открываются поры, делая его проницаемым для агрессивных веществ, что в конечном итоге приводит к раннему разрушению конструкции и, соответственно, сокращению срока службы. Применение топпингов позволяет решить сразу несколько проблем:

- упрочнить бетонную поверхность;
- избавиться от пылевыведения и обеспечить гигиеничность;
- увеличить общую прочность основания;
- повысить износостойчивость материалов;
- ограничить проникновение воды и различных вредных веществ;
- облегчить уход;
- продлить срок эксплуатации бетонному полу [7-9].

Среди недостатков топпинга можно отметить наличие поверхностных швов в напольном покрытии и низкая химическая стойкость.

Напольные смеси для бетонных полов бывают жидкими и сухими. Составляющие жидкого топпинга – это неорганические соединения, которые растворяются в воде. При нанесении жидкого топпинга на пол, эти соединения проникают во все поры бетона. После карбонат кальция вступает в химическую реакцию со свободной известью, находящейся в структуре бетона. В конечном итоге образуется нерастворимое прочное соединение. Данные технологии применяются в зданиях с пониженной влажностью. Достоинством жидкого топ-

пинга является то, что его можно использовать как на свежесделанном бетоне, так и на старых бетонных полах.

Основной составляющей сухого топпинга, является портландцемент. Такую смесь укладывают только на свежую и выровненную бетонную поверхность (рис. 1). При этом улучшается процесс сцепления смеси и основания, до 15 лет увеличивается срок службы бетонного покрытия [8].



Рис. 1. Бетонный пол с нанесенным топпингом

Для увеличения механической прочности и срока службы полов в составе топпингов используют различные заполнители:

- кварцевый, представляет собой очищенный кварцевый песок, который с помощью красящих пигментов изменяет вид верхнего слоя бетонного пола. Кварцевый заполнитель легко доступен, относительно дешев, неплохо выносит средней режим нагрузки. Рекомендуется применять кварцевые смеси в жилом строительстве, а также в помещениях с повышенной влажностью (бассейны, ванные комнаты, бани и др.);

- корундовый – обеспечивает повышенную износостойкость, по сравнению с кварцем. В качестве заполнителя может применяться как натуральный (минеральный) корунд, так и синтетический электрокорунд. Топпинги с дан-

ным заполнителем применяют для полов, которые подвержены высоким нагрузкам;

- металлический, представлен металлической стружкой, которая позволяет увеличивать стойкости к ударным воздействиям, а также успешно противостоит абразивному износу. Используется данный вид топпинга на промышленных предприятиях, где эксплуатируются тяжелые машины и оборудование;

- другие заполнители могут быть представлены базальтом, оксидом титана, карбидом кремния, карбидом железа и другими минеральными или синтетическими соединениями, придающими материалу специфические свойства [7, 9].

Выбор топпинга напрямую зависит от параметров эксплуатации напольного бетонного покрытия.

Сегодня напольные сухие смеси широко применяют в различных строительных объектах, таких как паркинги, склады и ангары, общественные здания, объекты машиностроения, здания металлургической и пищевой промышленности, медицинские учреждения, автосервисы (СТО) и автомойки, объекты сельского хозяйства, химического производства и энергетики, помещения холодильных и морозильных камер.

**Экспериментальная часть.** Целью данной работы является оценка качества и сравнительный анализ основных свойств сухих напольных смесей различных производителей. В данной работе представлены результаты лабораторных исследований более 20 видов топпингов как отечественного, так и зарубежного производства. Виды, а также производители исследованных топпингов представлены в табл. 1.

**Таблица 1**

Виды исследуемых напольных сухих смесей (топпингов)

№ п/п	Наименование топпинга	Предприятие, производитель	Страна
1	2	3	4
1	«Кварц»	ООО «ППС Трейд» (г. Москва)	Россия 
2	«Корунд»		
3	«Planko»		
4	«Planko Top 100»		
5	«Planko Top 200»		
6	«Материал 3005»		
7	«Материал 3015»		
8	«Материал 3515»		

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
9	«Refloor»	ООО «Refloor» (г. Новосибирск)	Россия 
10	«RefloorCT-S 200»		
11	«Монопол Топ 2»	ГК «Техбетон» (г. Екатеринбург)	Россия 
12	«Level Top Corund»	ООО «Ингри» (г. Мытищи)	Россия 
13	«RTM Max Top 450»	ООО «RTMGroup» (г. Москва)	Россия 
14	«KorodurNeodur»	Korodur	Германия 
15	«MasterTop»	Концерн BASF	Германия 
16	«MasterTop 450»		
17	«Herculit»	Линдекс	Швеция 
18	«MurexinBH 400»	Murexin	Австрия 
19	«Sikafloor Syn Top»	Sika	Швейцария 
20	«Roeland Qualidur HP»	PLACEO	Франция 
21	«Клебекрафт SYNT TOP»	Клебекрафт	Европейский союз 

Все рассматриваемые в работе топпинги предназначены для внутренних финишных покрытий, по способу укладки являются выравниваемыми, по плотности раствора – нормальными; по скорости твердения – нормальнотвердеющими. В качестве заполнителей в изучаемых напольных смесях применяют кварц или корунд.

Для выполнения работы была проанализирована 21 партия сухой смеси для упрочнения поверхности бетона (см. табл. 1). Для исследований из каждого сухого материала (топпинга) изготавливались партии образцов кубов размером  $10 \times 10 \times 10$  см (рис. 2) и  $7 \times 7 \times 7$  см (рис. 3) с водотвердым отношением (В/Т) равным 0,1.





Рис. 2. Внешний вид свежееотформованных образцов кубов размером  $10 \times 10 \times 10$  см, изготовленных из сухой смеси, предназначенных для испытаний на сжатие



Рис. 3. Внешний вид образцов кубов  $7 \times 7 \times 7$  см, изготовленных из сухой смеси, предназначенных для испытаний на истираемость

Образцы первые сутки твердели в формах, а последующие 27 суток набирали прочность в воде. После 28 суток твердения образцы подвергались испытаниям для определения основных физико-механических свойств:

- средняя плотность;
- предел прочности при сжатии;
- истираемость.

Все испытания образцов проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» [10] и ГОСТ 13087-2012 «Бетоны. Методы определения истираемости» [11], где в качестве абразивного материала применялся нормальный вольский песок.

Параллельно с данными исследованиями были проведены работы по определению вещественного состава нескольких партий сухих смесей. Для этого из общего количества материала методом квартования отбиралась проба массой около 30...50 г. Данная проба высушивалась и измельчалась до полного прохождения через сито №01.

Минералогический состав подготовленной пробы материала определялся путем рентгенофазового анализа методом порошка, реализуемого на рентгеновском дифрактометре Thermo Scientific ARL X'TRA Powder Diffractometer в Центре коллективного пользования имени проф. Ю.М. Борисова ВГТУ.

Испытания проводились согласно требованиям ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002...ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002. Для автоматизации измерений и обработки полученных дифрактограмм использовались пакеты прикладных программ, таких как ARL WinXRD, Siroquant и PDWin.

**Результаты и их обсуждение.** В табл. 2 приведены результаты определения средней плотности и предела прочности при сжатии образцов топпингов, изготовленных из сухих смесей.

Результаты определения предела прочности при сжатии образцов, изготовленных из сухих смесей

№ п/п	Наименование топпинга	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности при сжатии, МПа
1	«Кварц»	2245	37,7
2	«Корунд»	2290	39,4
3	«Planko»	2445	66,3
4	«Planko Top 100»	2305	27,5
5	<b>«Planko Top 200»</b>	2435	<b>71,8</b>
6	«Материал 3005»	2210	40,8
7	«Материал 3015»	2395	43,3
8	«Материал 3515»	2380	50,7
9	<b>«Refloor»</b>	2410	<b>74,9</b>
10	«RefloorCT-S 200»	2385	56,0
11	«Монопол Топ 2»	2340	44,3
12	«Level Top Corund»	2350	66,1
13	«RTM Max Top 450»	2315	49,8
14	«KorodurNeodur»	2385	44,0
15	«MasterTop»	2345	63,3
16	<b>«MasterTop 450»</b>	2365	<b>75,5</b>
17	«Herculit»	2330	57,0
18	«MurexinBH 400»	2315	54,4
19	«Sikafloor Syn Top»	2395	64,5
20	«Roeland Qualidur HP»	2355	56,0
21	«Клебекрафт SYNT TOP»	2115	23,4

Анализируя приведенные в табл. 2 данные, видим, что прочность исследуемых напольных сухих смесей колеблется в широких пределах от 23,4 до 75,5 МПа. Согласно требованиям ГОСТ 31358-2019 [6] исследуемые топпинги имеют классы по прочности на сжатие от В15 до В60 и могут выдерживать значительные и весьма значительные нагрузки. При этом самые высокие показатели имеют топпинги «Planko Top 200» (производство ООО «ППС Трейд», Россия) – 71,8 МПа, «Refloor» (ООО «Refloor», Россия) – 74,9 МПа и «MasterTop 450» (Концерн BASF, Германия) – 75,5 МПа.

Согласно требованиям ГОСТ 31358-2019 [6] напольные смеси для финишных покрытий по показателю истираемости разделены на группы:

- для умеренных нагрузок не более 0,8 г/см<sup>2</sup>;
- для значительных нагрузок не более 0,6 г/см<sup>2</sup>;
- для весьма значительных нагрузок не более 0,4 г/см<sup>2</sup>.

В соответствии с изложенным проранжируем полученные результаты по истираемости исследуемых топпингов и представим их в виде табл. 3.

**Таблица 3**

Результаты определения истираемости образцов, изготовленных из сухих смесей и распределение их по виду нагрузки на финишное покрытие

Наименование топпинга	Фактическое значение истираемости, г/см <sup>2</sup>	Вид нагрузки на финишное покрытие
-	-	<b>умеренные нагрузки, не более 0,8 г/см<sup>2</sup></b>
«Sikafloor Syn Top»	0,54	<b>значительные нагрузки, не более 0,6 г/см<sup>2</sup></b>
«Клебекрафт SYNT TOP»	0,49	
«RTM Max Top 450»	0,45	
«Refloor»	0,43	
«Корунд»	0,43	
«KorodurNeodur»	0,40	<b>весьма значительные нагрузки, не более 0,4 г/см<sup>2</sup></b>
«Монопол Топ 2»	0,38	
«Кварц»	0,35	
«Материал 3005»	0,35	
«Planko»	0,34	
«Herculit»	0,34	
«Planko Top 100»	0,34	
«RefloorCT-S 200»	0,33	
«Planko Top 200»	0,32	
«MasterTop 450»	0,32	
«Материал 3515»	0,31	
«Материал 3015»	0,30	
«MurexinBH 400»	0,29	
«Level Top Corund»	0,28	
«Roeland Qualidur HP»	0,23	
«MasterTop»	0,17	

Соответственно среди исследуемых в данной работе топпингов, отсутствуют напольные покрытия, предназначенные для восприятия умеренных

нагрузок (собственный вес, вес стационарного оборудования, внутренних перегородок, а также косвенные воздействия в результате усадки). К группе топпингов, способных выдерживать значительные нагрузки относятся сухие строительные смеси «Sikafloor Syn Top» (Швейцария), «Клебекрафт SYNT TOP» (Европейский союз), «RTM Max Top 450» (Россия), «Refloor» (Россия) и «Корунд» (Россия).

В группе сухих строительных смесей, предназначенных для несения весьма значительных нагрузок находятся все остальные топпинги с показателями истираемости от 0,40 до 0,17 г/см<sup>2</sup>.

Далее представим результаты определения минералогического состава двух наиболее лучших по физико-механическим показателям топпингов отечественного и зарубежного производства - «PlankoTop 200» и «MasterTop 450» (Германия).

Полученные экспериментальные данные представлены на рис. 4 и 5 и в табл. 4 и 5.

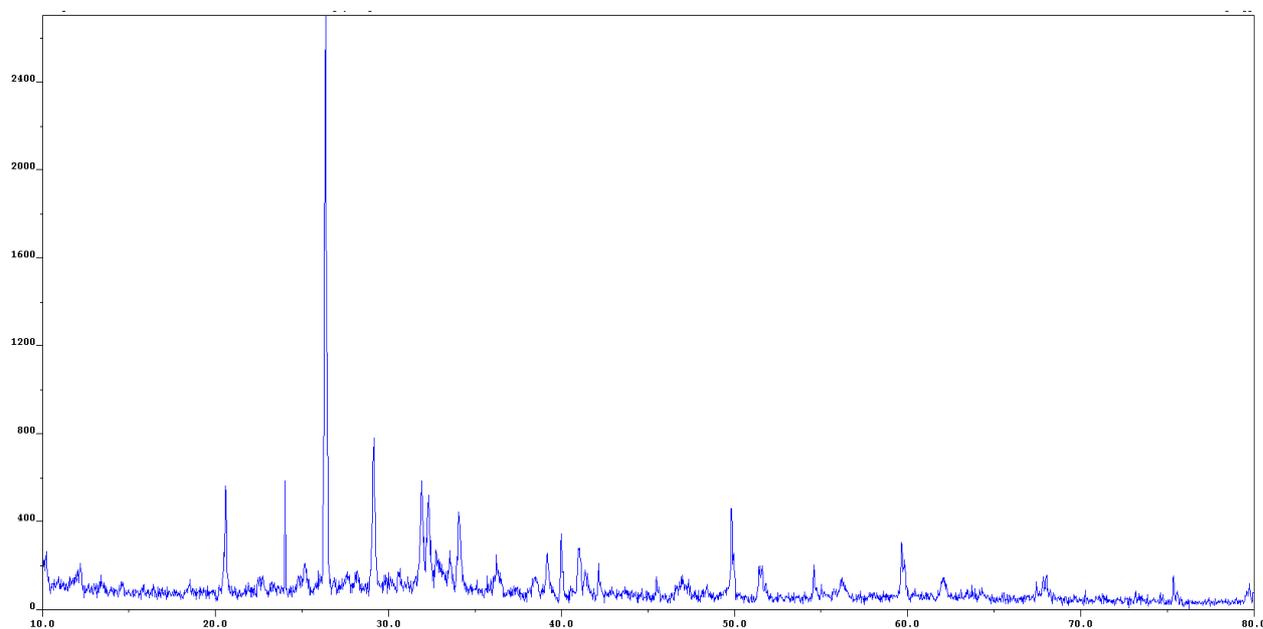


Рис. 4. Дифрактограмма топпинга «PlankoTop 200»

Минералогический состав топпинга «PlankoTop 200»

Содержание компонентов, %						
SiO <sub>2</sub> (Кварц)	3CaO·SiO <sub>2</sub> (Алит)	AlPO <sub>4</sub> (Фосфат алюминия)	BPO <sub>4</sub> (Ортофосфат бора)	Li <sub>2</sub> O (Оксид лития)	MgO (Периклаз)	NaNO <sub>3</sub> (Нитрат натрия)
42,5	27,2	24,6	5,7			

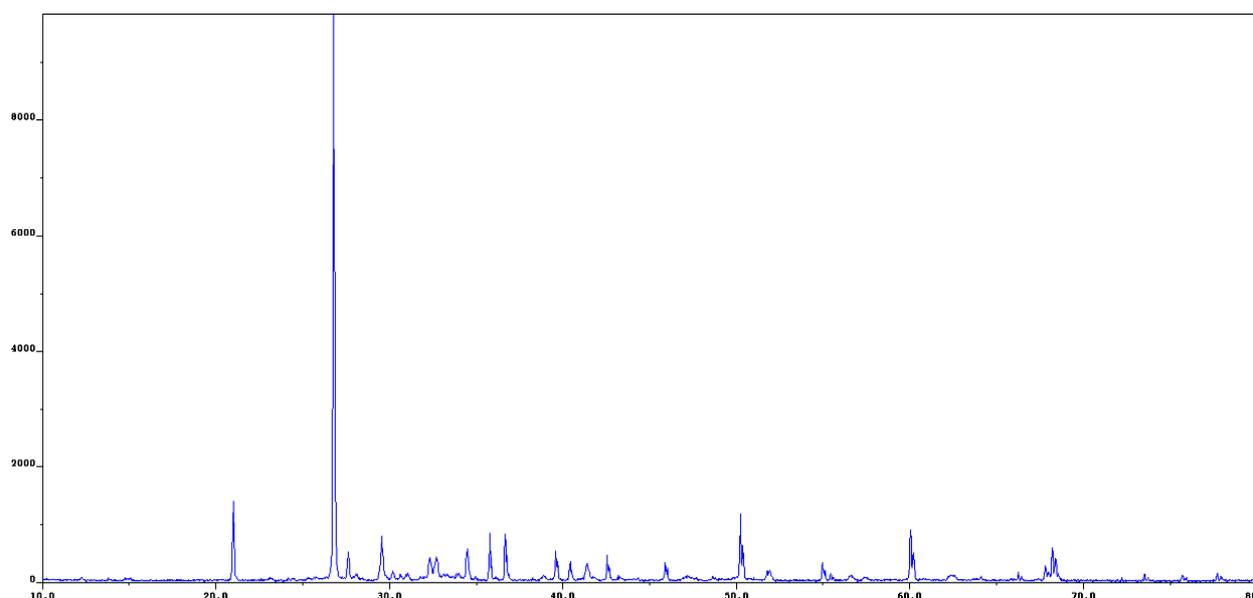


Рис. 5. Дифрактограмма топпинга «Master Top 450»

Минералогический состав топпинга «Master Top 450»

Содержание компонентов, %				
SiO <sub>2</sub> (Кварц)	3CaO·SiO <sub>2</sub> (Алит)	AlPO <sub>4</sub> (Фосфат алюминия)	CaO (Оксид кальция)	MgO (Периклаз)
36,7	21,0	33,6	4,4	4,3

Состав обоих изученных топпингов представлен практически одинаковыми компонентами. Минералогический состав напольной смеси «Planko Top 200» слагают кварц 42,5 %, алит – 27,2 % и фосфат алюминия – 24,6 %. Суммарное содержание соединений бора, лития, магния и натрия незначительно и составляет – 5,7 %.

Вещественный состав топпинга «MasterTop 450» состоит в основном из кварца (36,7 %), алита (21,0 %) и фосфата алюминия (33,6 %). На долю оксида кальция приходится - 4,4 %, оксида магния - 4,3 %.

Высокую прочность и износостойкость данным топпингам обеспечивает достаточно большое содержание алита, а также ускорителя твердения – фосфата алюминия.

**Заключение.** Физико-механические показатели отечественных топпингов, в принципе, сравнимы с аналогичными характеристиками европейских производителей. Среди российских производителей особенно стоит выделить топпинги «PlankoTop 200» (производство ООО «ППС Трейд», Россия) и «Refloor» (ООО «Refloor», Россия), которые обладают высокой прочностью и низкой истираемостью. Установлено, что прочность при сжатии образцов из смеси «PlankoTop 200» в возрасте 28 суток составляет 71,8 МПа, «Refloor» - 74,9 МПа, что соответствует классу бетона по прочности В60. Значение истираемости топпинга «PlankoTop 200» составляет 0,32 г/см<sup>2</sup>, «Refloor» - 0,43 г/см<sup>2</sup>, что свидетельствует о возможности применения данных смесей в напольных покрытиях со значительными и весьма значительными нагрузками.

Наибольшее значение прочности из всех изученных топпингов показал материал «MasterTop 450» немецкого концерна BASF – 75,5 МПа (В60). Наилучшая истираемость принадлежит топпингу «MasterTop» (0,17 г/см<sup>2</sup>) того же производителя.

При анализе вещественного состава отечественного топпинга «PlankoTop 200» и немецкого «MasterTop 450» выявлено практически одинаковый состав компонентов. Так минералогический состав топпинга «PlankoTop 200» слагают кварц 42,5 %, алит – 27,2 % и фосфат алюминия – 24,6 %; суммарное содержание соединений бора, лития, магния и натрия составляет – 5,7 %.

Минералогический состав топпинга «MasterTop 450» состоит в основном из кварца (36,7 %), алита (21,0 %) и фосфата алюминия (33,6 %). На долю оксида кальция приходится - 4,4 %, оксида магния - 4,3 %.

### **Список литературы**

1. Усачев А.М., Усачев С.М. Строительные материалы и изделия. Технология строительных конструкций и изделий. Воронеж, 2011. 252 с.

2. Konietzko A. The use of modern factory-made dry building mixes / A. Konietzko // ZKG (Zement. Kalk. Gips) International. 985, no.12.
3. <http://alibrant.ru/alibrant/about.htm>. Сухие строительные смеси, 2011.
4. Дергунов С.А., Орехов С.А. Сухие строительные смеси (состав, технология, свойства). Оренбург: ОГУ, 2012. 106 с.
5. ГОСТ 31189-2015. Смеси сухие строительные. Классификация.
6. Попов К.Н. Современные материалы для устройства полов // Строительные материалы. 2000 г.
7. Шестопалов А.А. Технологии устройства бетонных полов // Строительство. Новые технологии. Новое оборудование. 2007 г.
8. Голенковская В.А. Устройство наливных полов с применением сухих строительных смесей // Строительные материалы. 2000 г.
9. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
10. ГОСТ 13087-2012. Бетоны. Методы определения истираемости.
11. Изучение основных свойств топпингов различных производителей / А.М. Усачев, К.А. Рыкова, С.А. Каньшина // Научная опора Воронежской области: сборник трудов победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2019. С. 97-98
12. ГОСТ 31358 – 2019. Смеси сухие строительные напольные. Технические условия.
13. ГОСТ 18105-2010. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.

### **References**

1. Usachev A.M., Usachev S.M. Building materials and products. Technology of building structures and products. Voronezh, 2011. 252 p.

2. Konietzko, A. The use of modern factory-made dry building mixes / A. Konietzko // ZKG (Zement. Kalk. Gips) International. 1985, no.12.
3. <http://alibrant.ru/alibrant/about.htm>. Dry building mixes, 2011.
4. Dergunov S.A., Orekhov S.A. Dry building mixes (composition, technology, properties). Orenburg: OSU, 2012. 106 p.
5. GOST 31189-2015. Dry construction mixes. Classification.
6. GOST 31358-2019. Dry construction floor mixes. Technical conditions.
7. Popov K.N. Modern materials for the device of floors // Building materials. 2000.
8. Shestopalov A.A. Technologies of the device of concrete floors // Construction. New technologies. New equipment. 2007.
9. Golenkovskaya V.A. The device of self-leveling floors with the use of dry building mixes // Building materials. 2000.
10. GOST 10180-2012. Concretes. Methods for determining the strength of the control samples.
11. GOST 13087-2012. Concrete. Methods for determining attrition.
12. The study of the main properties of toppings of various manufacturers / A.M. Usachev, K.A. Rykova, S.A. Kanshina // Scientific support of the Voronezh region: a collection of works of the winners of the competition of research works of students and postgraduates of VSTU in priority areas of science and technology development. Voronezh: Voronezh State Technical University, 2019. P. 97-98.
13. GOST 18105-2010. Concretes. Rules of control and evaluation of strength.

---

**Усачев Александр Михайлович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций Воронежского государственного технического университета

**Рыкова Ксения Александровна** – магистрант группы мЭКМ-201 кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций Воронежского государственного технического университета

## **ОСОБЕННОСТИ ЗОЛ УНОСА В КАЧЕСТВЕ НАПОЛНИТЕЛЕЙ В ПОЛИМЕРБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ**

*С.Н. Золотухин, И.Р. Сафонов\*, И.В. Винокуров, С.О. Садыков,  
Е.И. Иващенко*

*Воронежский государственный технический университет,  
Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

*\*Адрес для переписки: Сафонов Игорь Романович, e-mail: safon3105@yandex.ru*

Основной целью данной работы является определение возможности замены цемента на золу-унос. С целью обобщения информации был проведен литературный обзор влияния активности поверхности применяемых компонентов на свойства получаемых материалов. За основу была взята теория ДЛФО и исследования Золотухина С.Н, которые показали взаимосвязь между величиной энергии взаимосвязи водных пленок на поверхности наполнителей с прочностными показателями полимерных композитов, получаемых на их основе. Практической частью работы является проведение исследования для фиксации результатов изменения прочности призм из каутона, в составе которых менялся мелкий заполнитель (цемент) на золу-унос. Для объяснения природы взаимодействия наполнителя и вяжущего наиболее важными являются силы межфазного взаимодействия, которые объясняются теорией двойного электрического слоя. Изменение двойного электрического слоя определяется по дзета-потенциалу. В результате этого появляется возможность замены цемента на остаток от сгорания топлива – золы-унос, с целью снижения стоимости и сокращения загрязнения атмосферы. Недостатком данной методики является сложность выполнения исследований. В результате проведенных исследований и сравнении прочностных показателей золы-унос с цементом приходим к выводу, что применение золы-унос вместо цемента, является экономически и экологически целесообразным.

*Ключевые слова: двойной электрический слой, теория ДЛФО, цемент, зола уноса, экология, бетон, каутоны, силы взаимодействия водных пленок, дзета-потенциал*

**FLY ASH AS A PART OF FILLER IN POLYMER CONCRET**

*S.N. Zolotuhin, I.R. Safonov\*, I.V. Vinokurov, S.O. Sadykov, E.I. Ivashchenko*

*Voronezh State Technical University,*

*Russian Federation, 394006, Voronezh, ul. 20-letia Oktiabria, 84*

*\*Corresponding author: Safonov Igor Romanovich, E-mail: safon3105@yandex*

The main purpose of this work is to determine the possibility of replacing cement with fly ash. In order to summarize the information, a literary review of the effect of the surface activity of the used components on the properties of the obtained materials was carried out. The basis for this work was takes the theory of DLVO and the research of Zolotukhin S.H, which showed the relationship between the energy value with the strength characteristics of polymer composites. A practical part of the work is to conduct a study the results of changing the strength of prisms of rubber concrete with replaced cement by a fly ash. As a result, of the studies carried out and comparison of the strength indices of fly ash with cement, we conclude that the use of fly ash instead of cement is economically and environmentally feasible.

***Keywords:** double layer, DLVO theory, cement, fly ash, ecology, concrete, rubber concrete, zeta potential, potential energy*

**Введение.** Основными целями работы являются – снижение стоимости полимерных композиционных материалов, с заменой цемента, на многотонажный высокодисперсный отход, от сжигания углей – золу-унос и проверка прочности получаемых композитов, и проведение литературного обзора, позволяющего понять работу высокодисперсных материалов в полимербетонах.

В данный момент одной из главных проблем населения является проблема загрязнения окружающей среды. Одним из основных факторов являются выбросы углекислого газа в атмосферу Земли. Огромную долю выбросов занимает строительная сфера, а именно промышленное производство материалов, в которое входит создание цемента. Выхода из этой ситуации можно добиться

заменой цемента на топливные отходы, такие как зола-унос. Объемы переработки золы-унос в России составляют всего 4% от общего количества, примерно равное около 90 млн. т в год. Переработка золы-унос, лежащей в отвалах, является актуальной задачей современности.

Зола-унос – это высокодисперсный наполнителей, обладающий большим количеством свободной поверхностной энергии дигидратации поверхностных наполнителей, она способны формировать структуру полимерного композита за счет свободной поверхностной энергией, имеющийся у наполнителей при удалении водных пленок с их поверхности. Ее можно использовать, как в бетонах, так и в полимербетонах.

Несомненным достоинством композитов на полибутодиеновых каучуковых связующих является их высокая прочность, как на сжатие, так и на растяжение и высокая химическая стойкость. К недостаткам, препятствующим их более широкому внедрению, можно отнести недостаточную изученность, высокую стоимость и сложность технологии производства. Полимербетоны являются композиционными материалами, состоящими из полимеров, отвердителей, наполнителей и заполнителей. Наиболее существенным в получении высокопрочных химически-стойких полимербетонов является взаимодействие на границе вяжущего и наполнителя, в виду развитой поверхности наполнителей. Поэтому исследования этих процессов является наиболее важным в понимании формирования структуры полимерных композитов.

Литературный обзор современных материалов по использованию наполнителей в полимербетонных материалах, показал, что в качестве наполнителей используются цемент, гипс, известь и другие высокодисперсные материалы. К недостатку материалов можно отнести их высокую стоимость и большое количество энергии, затраченное на их диспергирование. Поэтому одним из важных направлений исследований является замена дорогостоящих наполнителей, производство которых связано с выбросами углекислого газа в атмосферу земли, на более дешевые и экологически чистые, является актуальным.

**Материалы, методы и оборудование.** Испытания проводились в центре коллективного пользования имени профессора Ю.М. Борисова. Для исследования прочности при осевом сжатии использована установка Instron1500HDX.

Песок, применяемый в исследованиях, добывается в Воронеже на территории Стрелецкого карьера. Щебень – Павловского карьера. Физические данные приведены в таблице 1.

**Таблица 1**

Результаты микрохимического анализа исходного песка

Заполнитель	Размер фракций, мм	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	Пустотность, %
Кварцевый песок	1,25...2,50	2,65	1,61	33,0	39,1
	0,63...1,25				
	0,315...0,63				
Гранитный щебень	5...20	2,67	1,5	5,4	41,4

Зола-унос, применяемый в исследованиях, добывается в Воронеже на территории отвала ТЭЦ-1. Данные приведены в таблице 2.

**Таблица 2**

Физико-механические свойства золы-уноса

Наименование показателя	Зола Воронежской ТЭЦ-1
Внешний вид	Порошок светло-серого цвета
Плотность в естественном состоянии, см <sup>2</sup> /г	2500...2700
Состав по массе:	
SiO <sub>2</sub> , %	48,0...52,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	18,5...21,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	12,5...14,5
CaO, %	5,0...5,5
MgO, %	2,0...3,0
K <sub>2</sub> O, %	1,0...2,0
Na <sub>2</sub> O, %	1,0
S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	0,3...0,4

Каучук марки ПБН [ТУ 38.103641-98], применяемый в исследованиях, производится в Воронеже на территории предприятия Ефремовского завода синтетического Каучука. Данные приведены в таблице 3.

Таблица 3

## Физико-механические свойства низкомолекулярного каучука

Наименование показателя	ПБН
Внешний вид	Прозрачная жидкость
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	890,0
Динамическая вязкость, Па·с	3,0...3,5

Цемент марки 400 [ГОСТ 31108-2020], применяемый в исследованиях, производится на территории Орловского цементного завода «Орелстроймех». Данные приведены в таблице 4.

Таблица 4

## Физико-механические свойства цемента

Наименование показателя	Цемент
Внешний вид	Серый порошок
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1300
Средний размер частиц, мкм	15...20
Активность, МПа	44

Сера техническая [ГОСТ 127.1-93], оксид цинка [ГОСТ 10262-73], оксид кальция [ГОСТ 8677-76] и тиурам-Д [ГОСТ 740-76] приобретается на предприятии «Химреактив». Данные приведены в таблицах соответственно 5, 6, 7, 8.

Таблица 5

## Физико-механические свойства сера техническая

Наименование показателя	Сера техническая
Внешний вид	Ярко-желтый порошок
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2070
Температура плавления, оС	114

Таблица 6

## Физико-механические свойства оксида цинка

Наименование показателя	Оксид цинка
Внешний вид	Белый порошок
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	5600...5700

Таблица 7

## Физико-механические свойства оксида кальция

Наименование показателя	Оксид кальция
Внешний вид	Белый порошок
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2500...2900

Таблица 8

## Физико-механические свойства тиурам-Д

Наименование показателя	Тиурам-Д
Внешний вид	Белый порошок
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1300...1400
Температура плавления, оС	140...154

**Литературный обзор.** Для определения возможности замены цемента на золу унос были проведены литературный обзор влияния активности поверхности применяемых компонентов на свойства получаемых материалов. Первыми исследованиями можно считать работы, проведенные Б.В. Дерягиным и Л.Д. Ландау, Э. Фервеем и Дж.Т. Овербеком, которые показали, что особое место в формировании структуры композиционных строительных материалов принадлежит водным пленкам.

В исследованиях Xinyi Shen, Ian C. Bourg представлены первые предсказания о наличии свободной энергии взаимодействия наночастиц смектитовой глины методом МД во всем диапазоне межчастичных расстояний, где модель ДЛФО является точной (>3 нм), до короткодействующих состояний набухания. Также они подтверждают предыдущие теоретические предположения о существовании сильного не-ДЛФО-притяжения с диапазоном ~ 3 нм, возникающего из-за специфических ионно-глинистых кулоновских взаимодействий в двойном электрическом слое. В этой статье доказана возможность теории ДЛФО для смектитовых глин [7].

Работа С. Neubauer, Ming Yang, H. Jennings заключается в применении теории ДЛФО к цементным суспензиям, содержащим добавки. Сравнивались две разные партии одного и того же цемента, отличающиеся только историей хранения. Обнаружено, что, хотя их общее поведение при осаждении схоже,

существуют различия в дзета-потенциале. Это открытие предполагает, что стерические препятствия играют большую роль по сравнению с электрическим отталкиванием в дефлокуляции цементных паст, чем считалось ранее [1].

С помощью теории Дерягина-Ландау-Вервея-Овербека ДЛФО для диспергирования-флокуляции гетерогенных частиц с различным поверхностным потенциалом Papat Termkhajornkit, Toyoharu Nawa применили для объяснения влияния летучей золы на реологические свойства цементного теста, содержащего нафталинсульфонатный суперпластификатор. Степень потенциального энергетического барьера зависела от абсолютного значения поверхностного потенциала, который был представлен функцией количества адсорбированного суперпластификатора. Объем твердого вещества летучей золы также влиял на изменение текучести. Эффект потенциального энергетического барьера между частицами был выше, чем у общего объема твердого вещества летучей золы [5].

В реферате А.В. Петрова описано, что полимерные композиционные материалы включают в себя широкий класс материалов, где для достижения необходимых функциональных свойств полимерная матрица сочетается с различными по химической природе компонентами. В связи с развитием нанотехнологий возрос интерес к полимерным материалам [20].

А в работах E.R. Teixeira, A. Camões, F.G. Branco было исследована замена цемента на золу-унос, что не снижает прочностных показателей, проницаемости и долговечности бетонных смесей. Отсюда можно сделать вывод, зола-унос обладает высокой дисперсностью и активностью, которая позволяет не снижать прочности получаемых цементных композитов при его замене [2].

Так же про влияние наполнителей на свойства композитных изделий описано в статье Мусаевой А.Ю., о физико-химических и технологических факторах, которые тесно связаны друг с другом. Решающую роль в обеспечении прочности волокнистых композитов играет адгезионная прочность соединения «наполнитель-матрица». Она в значительной степени влияет на прочностные характеристики полимерного композиционного материала и поэтому поверх-

ность раздела «наполнитель-связующее» совершенно оправданно следует рассматривать как третий компонент полимерного композита [18].

Нгуен Динь Чинь, Нгуен Тхе Винь, Баженов Ю. М. применили комплексные органоминеральные модификаторы, состоящие из суперпластификатора, золы-уноса и микрокремнезема или золы рисовой шелухи, которые позволяют получить высокопрочные бетоны, что говорит о возможности замены цемента на золу [19].

Про один из перспективных способов утилизации зол-уноса, написали Унг Нго Суан, Лам Танг Ван, Булгаков Б.И., Александрова О.В., Ларсен О.А. – это введение их в состав минеральных вяжущих веществ или в бетонные и растворные смеси в качестве активных минеральных добавок, обладающих пуццоланическими свойствами. Для получения бетонной смеси было использовано вяжущее, состоящее из сульфатостойкого портландцемента с тонкодисперсными минеральными добавками в виде низкокальциевой золы-уноса одной из теплоэлектростанций и микрокремнезема. Поэтому, замена цемента на золу-унос возможна [24].

Об образовании полимербетонов описано в статье Ярцева В.П. В данной статье рассматривается вопрос разработки и применения композиционных материалов. Поднимается тема влияния наполнителя на структурообразование полимербетонных композитов. Для разработки оптимальной композиции используется полиструктурная теория, характеризующая новый этап в технологии производства композиционных материалов. Как следствие, наблюдается развитие в создании новых композитов, а также производстве полимерных смесей с высокими или заданными физико-механическими свойствами [27].

Про технологию изготовления полимербетонов представлено в статье Коломниковой И.И. и Земцова Е.С. В ней рассмотрены различные технологические решения изготовления полимербетонных изделий и показано в зависимости от применяемых наполнителей и заполнителей изменение физико-механических свойств полимербетона [17].

Литературный обзор позволяет следующие выводы, что процессы, идущие на границе полимер-наполнитель, являются определяющими при получении химически стойких композитов. Возможно, исследования показывают, что зола-унос является высоко активным наполнителем, способным проявлять вяжущие свойства и участвовать в структурообразовании композиционных материалов.

Важным показателем при подборе составом полимерных композитов является отношение полимер-наполнитель и дисперсность применяемых материалов, которые определяют величину полимерных пленок, формирующихся на поверхности наполнителей. Доказано, что оптимальная толщина полимерных пленок имеет порядок 100 нанометров, что хорошо согласуется с теорией ДЛФО. В работах С.Н. Золотухина описаны процессы взаимодействия между дисперсными минеральными компонентами через водные пленки, находящиеся на их поверхности, позволяет направленно на формирование структуры композитов с получением наперед заданных свойств и определение наиболее выгодных состояний эксплуатации получаемых материалов. Исследования фосфогипса и дисперсных строительных материалов с использованием термогравиметрических методов на дериватографе (рис. 1, 2), доказали существование зависимости между толщиной водной пленки, температурами первых эндоэффектов и прочностными показателями и химической стойкостью получаемых материалов. Эта взаимозависимость объясняется физико-химическими процессами, которые происходят на поверхности дисперсных компонентов [13, 14, 15, 16, 21, 25].

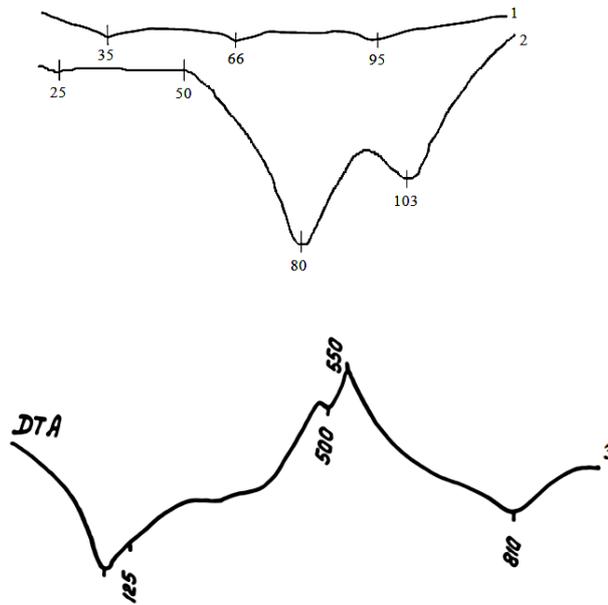


Рис. 1. Кривые дифференциально-термического анализа порошков:  
1– карбоната кальция и 2- фосфогипса дигидрата; 3 – цемента [13]

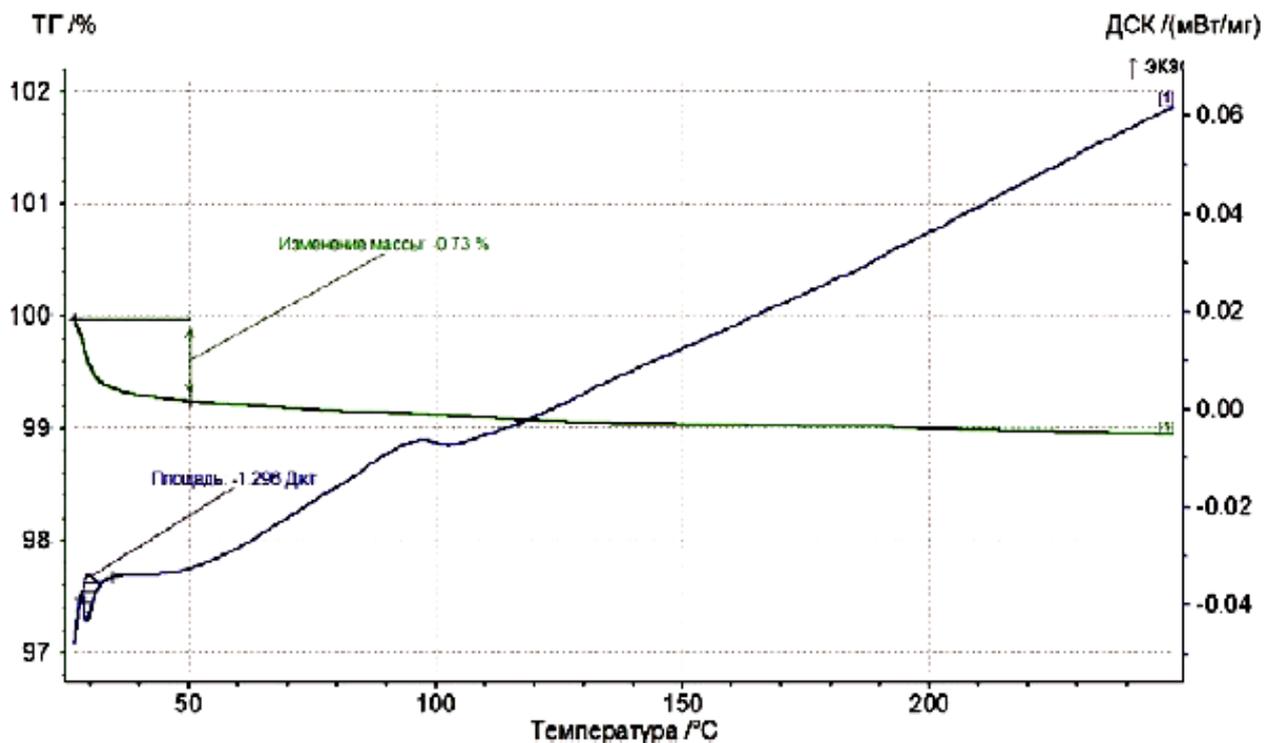


Рис. 2. Кривые дифференциально-термического анализа песка [13]

В работах замечено, что первые эндоэффекты показывают наличие свободной поверхностной энергии на поверхности минеральных компонентов, и найдена взаимозависимость, что, чем больше, тем прочнее вода удерживается на поверхности этих наполнителей, тем прочнее и выше химическая стойкость

получаемых материалов. Недостаток, связанный с, наполнителями, дающие более высокие прочностные показатели и показатели химической стойкости обладают повышенной полимероемкостью. С помощью этого можно регулировать полимероемкость при ведении наполнителя, такого как кварцевый песок, который не обладает способностью удерживать воду на своей поверхности [13, 14, 15, 16, 21, 25].

Кроме этого замечено, что при температуре более 60°C водные пленки меняют свою толщину, а при температурах 105...110°C они удаляются с поверхности элементов, и на их месте появляются некомпенсируемые силы, формирующие структуру полимерной матрицы. По первым эндоэффектам можно также определить температуру нагрева минеральных компонентов, при которых водные пленки адсорбционной влаги будут удаляться с поверхности минеральных компонентов. Перемешивание нагретых минеральных компонентов с полимерной матрицей будет формировать бездефектную структуру полимерного композита [13, 14, 15, 16, 21, 25].

Проведенные ранее исследования показывают, что диагностика энергии связи минеральных компонентов с помощью методов деривотографии позволяет прогнозировать свойства получаемых композиционных материалов и резко уменьшая время их разработки, снижение стоимости, а также ускорит сроки их внедрения [13, 14, 15, 16, 21, 25].

**Схема взаимодействия минеральных компонентов коллоидных систем.** Предложена следующая схема взаимодействия высоко дисперсных коллоидных систем (рис. 3, 4) [9]. На поверхности минеральной частицы коллоидного размера образуется водная пленка, состоящая из нескольких слоев (рис. 3) [13, 14, 15, 16, 21, 25].

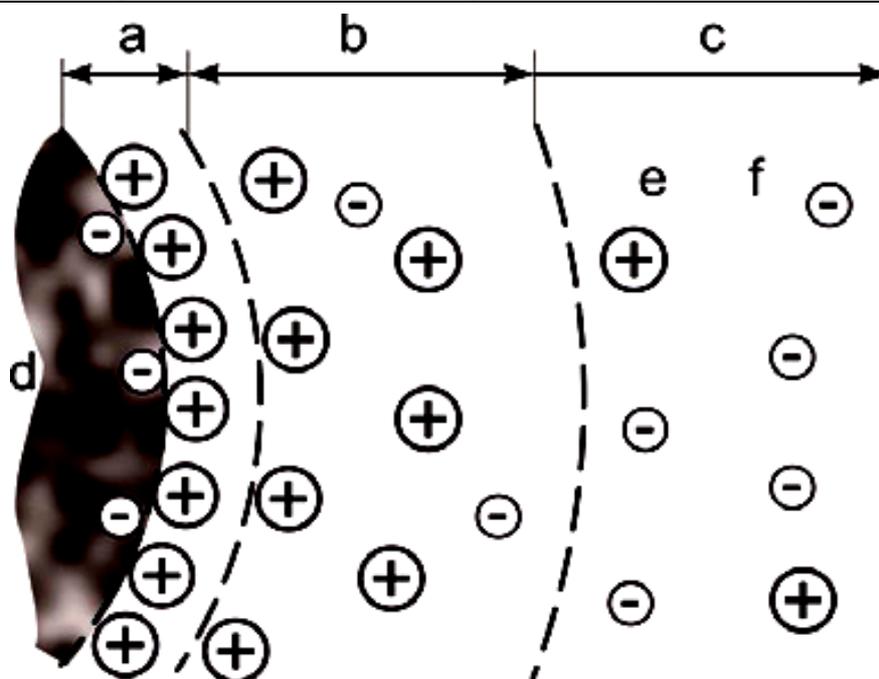


Рис. 3. Строение водной пленки вблизи поверхности минеральной частицы коллоидного размера [13]: d–коллоидная частица с отрицательным зарядом; a - область адсорбционного слоя, занятая связанной водой,  $a=10^{-9}$ м; b - диффузная часть двойного электрического слоя, занятая осмотически-поглощенной водой,  $b=10^{-9}-10^{-7}$ м; c - область за пределами двойного электрического слоя, занятая свободной водой,  $c>10^{-7}$ м

В области a (рис. 3) согласно теории ДЛФО появляются водородные связи, благодаря которым удерживается 2-3 молекулы воды, которые создают огромные электрические поля и давления, быстро спадающие на расстоянии. Далее возникает диффузная зона (область b, рис.3), толщина которой зависит от природы материала, pH среды и температуры среды. В области c наблюдается увеличение подвижности гидратированных ионов при взаимодействии с другими коллоидными частицами, которые встраиваются в пространство композиционного материала между полидисперсными частицами больших размеров образуя новую структуру (рис. 4) за счет взаимодействия заряженных частиц в областях c, b и a (рис.3) [13, 14, 15, 16, 21, 25].

Первые эндоэффекты способствуют удалению диффузионных пленок, образовавшихся на мелких коллоидных частицах, которым легче всего перемещаться и скапливаются в местах термодинамической неустойчивости – в зонах 2 (рис. 4). Более крупные коллоидные частицы показывают второй эндоэффект,

третий – дегидратации воды с поверхности частиц минеральных компонентов размерами до 100 мкм [13, 14, 15, 16, 21, 25].

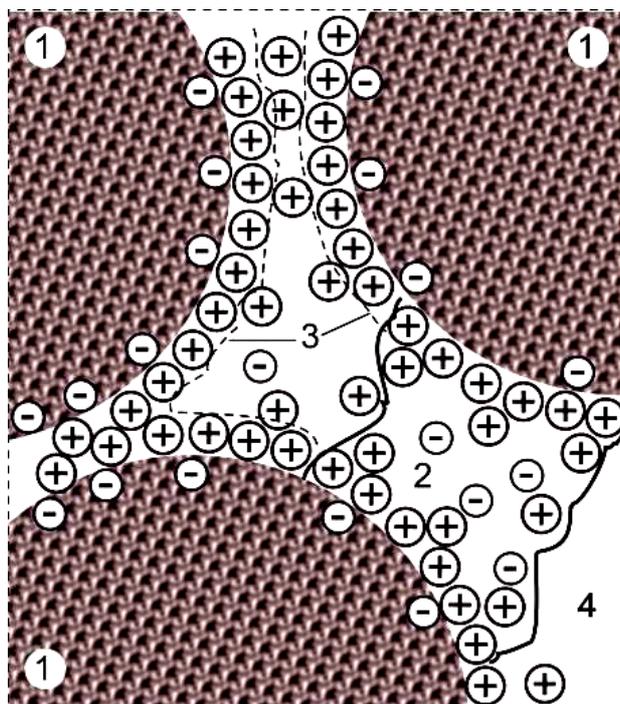


Рис. 4. Фрагмент структуры в минеральных компонентах: 1. Частица минерального компонента; 2. Места термодинамической нестабильности; 3. Область адсорбционного слоя, толщиной в 2-3 молекулы воды (1нм), имеющая водородные связи и занятая связанной водой; 4. Пора с воздухом [13]

Процессы, протекающие на поверхности минеральных компонентов, позволяет направленно формировать структуру композитов, сполучением наперед заданных свойств и определять наиболее целесообразные условия эксплуатации получаемых материалов [13, 14, 15, 16, 21, 25].

**Влияние размеров дисперсности и начальной прочности минеральных компонентов.** С целью снижения стоимости наполнителей различными исследованиями было доказано, что диспергирование минеральных компонентов и их влияние на прочностные показатели получаемых полимерных композитов, показал, что прочность компонентов не влияет на свойства получаемых композитов, что позволяет сделать вывод о том, что нет необходимости диспергировать минеральные компоненты, обладающие изначально высокими прочностными показателями, так как диспергирование мягких материалов (гипс, фосфогипс, доломит, мел, глина, опока, трепел, шлаки, туф и т.п.) позволит

резко снизить энергозатраты на помол и стоимость минеральных компонентов [13, 14, 15, 16, 21, 25].

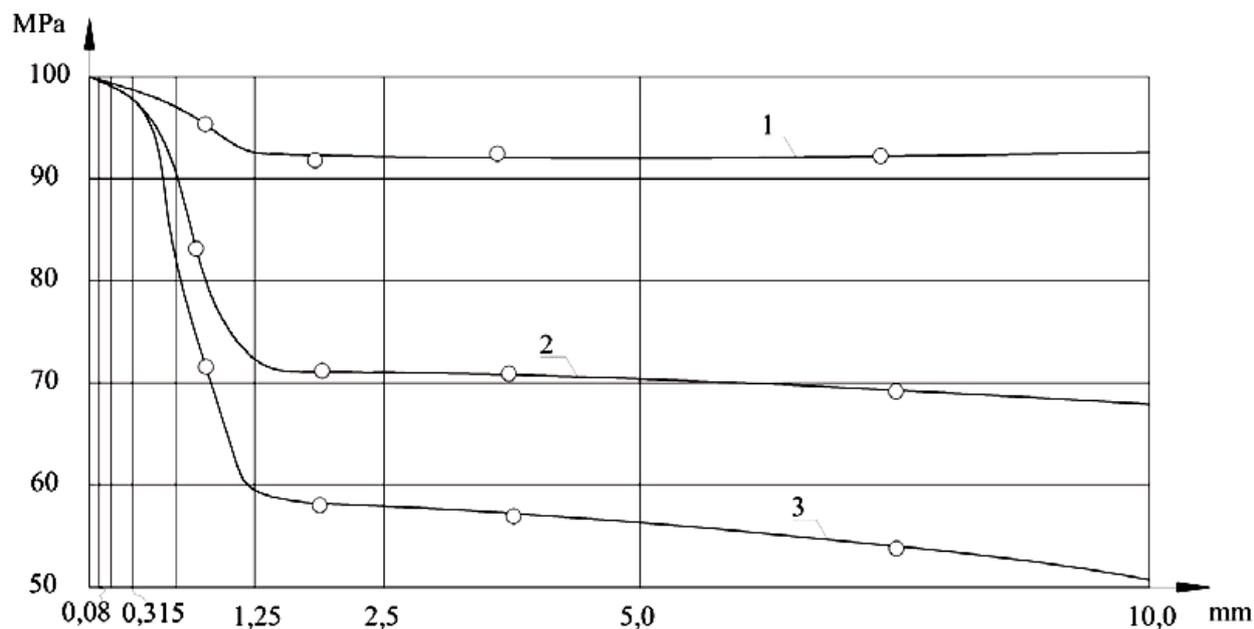


Рис. 5. Изменение прочности полиэфирного полимербетона от размера и прочности минеральных частиц: 1 – высокопрочные частицы, 2 – среднепрочные частицы, 3 – малопрочные частицы [13]

Подбор составов. Физико-механические свойства образцов определяли в соответствии с требованиями СН 525-80, ГОСТ25881-83, ГОСТ310.4-81. Формование образцов производилось при помощи стальной опалубки.

Конечные элемент строительства отличаются по форме от кубов, поэтому для исследования основной характеристики бетонов – прочности бетонов при осевом сжатии  $R_b$ , используются призмы. Призменная прочность бетона уменьшается с увеличением отношения  $h/a$  по сравнению с кубиковой. Размеры призм –  $40 \times 40 \times 160(h)$  мм.

Весовые характеристики определяли при помощи электронных лабораторных весов с точностью до 1 г. Плотность каутона –  $2430 \text{ кг/м}^3$ . Объем призмы –  $0,00026 \text{ м}^3$ . В состав призм входит: тиурам-Д в количестве 2,48 гр, оксид кальция 3,11 гр, оксид цинка – 9,95 гр, сера техническая – 24,88 гр, низкомолекулярный каучук СКДНН - 49,76 гр, кварцевый песок средней фракции -

149,28 гр, щебень фракции 5-20 мм - 329,66 гр. В зависимости от эксперимента: портландцемент М 200 или зола-унос ТЭЦ (теплоэлектроцентраль).

Перед заливкой балки все компоненты перед заливкой были выдержаны в течении 600 мин при температуре 105...110°C, с целью удаления воды с их поверхности, после чего температура опускается до температуры 65...70°C, и идет перемешивание полимерной матрицы с прочими наполнителями, что позволяет предотвратить попадание воды в систему полимер-композит, и использовать поверхностные силы и повысить прочность получаемых материалов. Для перемешивания смеси был использован скоростной смеситель с подогревом до 100°C.

**Проведение испытаний.** Перед началом испытания на поверхности призм были установлены датчики (тензометры) на середины двух не параллельных граней, для отслеживания деформаций.

Схема загрузки показана на рис. 6. Фотографии до испытаний на рис 7.

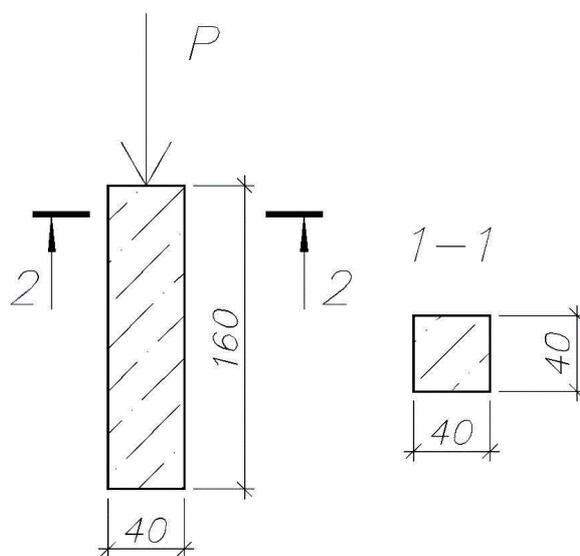


Рис. 6. Схема загрузки и сечения призмы

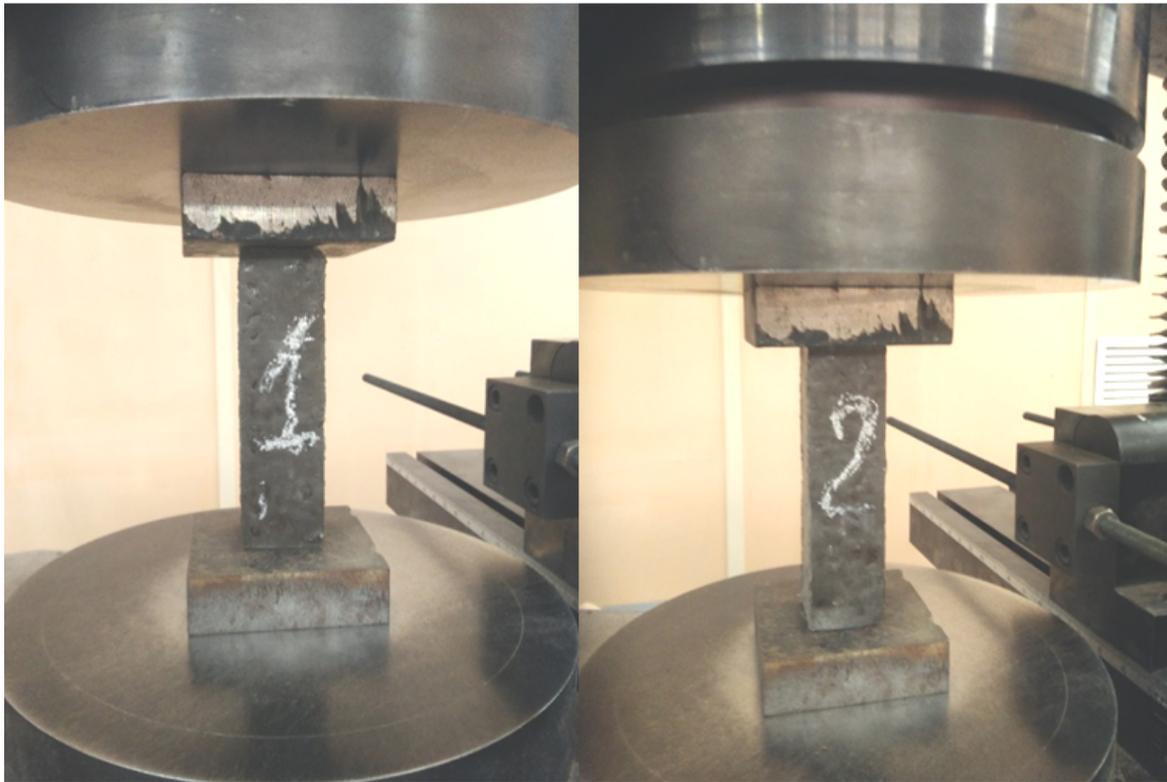


Рис. 7. Общий вид призм до испытания

**Результаты исследований.** Результаты исследований разрушающей нагрузки призм приведены в табл. 9.

**Таблица 9**

Значения экспериментальной прочности осевого сжатия.

№	Состав	Прочность при сжатии МПа
1	Портландцемент М200	76,5
2	Зола-унос ТЭЦ	69,0

Расчет разницы в процентах проводится по формуле:

$$\frac{76,5 - 69,0}{76,5} * 100\% = 0,098 * 100\% = 9,8\%$$



Рис. 8. Общий вид призм после испытания

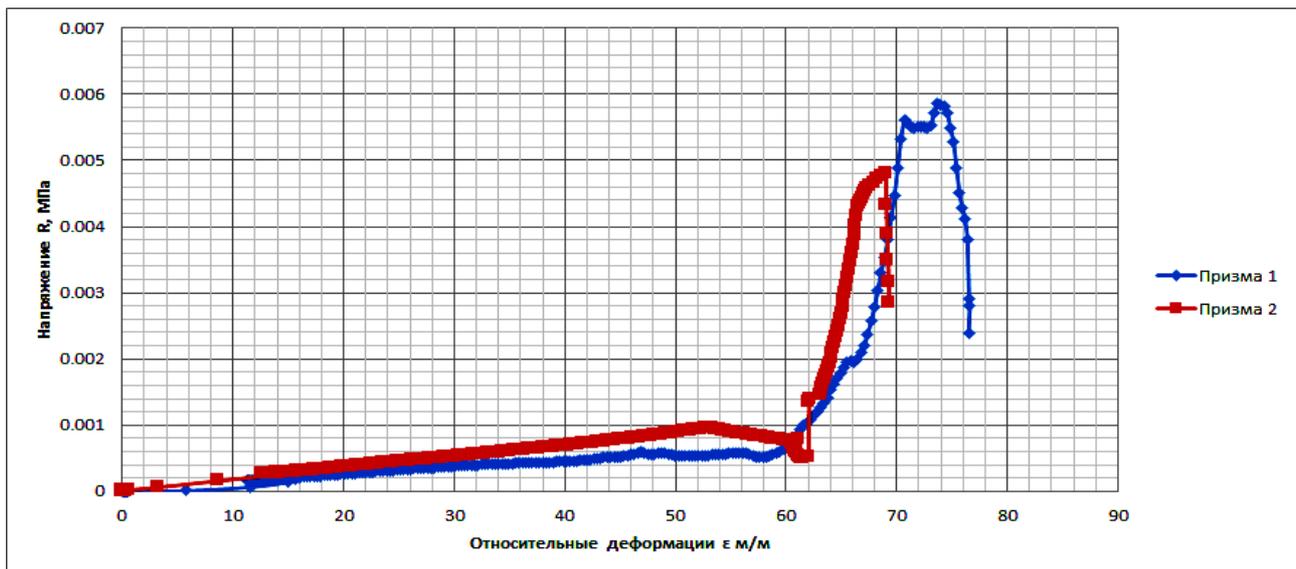


Рис. 9. График зависимости напряжения от относительной деформации

### Заключение:

1. Изучив физико-химические свойства представленных исходных материалов, можно сделать вывод, что каждый из представленных веществ будет играть свою роль в геометрии, зонировании, физико-химических процессах структурообразования полимербетонных композитов.
2. Для более широко внедрения полимерных композиционных материалов необходимо снижение их стоимости.

3. Проведенные исследования показывают, что зола-унос обладает высокой дисперсностью и водоудерживающей способностью, характеризующейся большой площадью поверхности первого эндоэффекта на дериватограммах.

4. Основной вклад золы-унос в прочность композитов, получаемых ее применением, связан с ее высокой дисперсностью и наличием большого количества свободной поверхностной энергии.

5. Одним из основных направлений использования золы-унос необходимо считать ее переработку в строительные материалы, изделия и конструкции и в качестве наполнителей полимерных композиционных материалов.

6. Сравнение прочностных показателей золы-унос по сравнению с цементом говорят о том, что зола-унос, обладает большим количеством свободной поверхностной энергии и ее применение вместо цемента, является экономически и экологически целесообразным.

### **Список литературы**

1. Neubauer C. M., Yang Ming, Hamlin M, Jennings A.B. Interparticle Potential and Sedimentation Behavior of Cement Suspensions: Effects of Admixtures // *Advanced Cement Based Materials*. 1999. V.8. P. 17-27.

2. Teixeira E.R., Camões A., Branco F.G. Synergetic effect of biomass fly ash on improvement of high-volume coal fly ash concrete properties // *Construction and Building Materials*. 2022. V. 314. P. 125680.

3. Maolin Lia, Motoyoshi Kobayashi. The aggregation and charging of natural clay allophane: Critical coagulation ionic strength in the presence of multivalent counter-ions // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2021. V. 626. P. 127021.

4. Zhangab Ming, Panwu Lia Wei Yaoab, Zeping Xua Rong Fanc. Enhanced kaolinite flotation using amine coated nanobubbles // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2022. V. 638. P. 128296

5. Termkhajornkit Pipat, Toyoharu Nawa. The fluidity of fly ash cement paste containing naphthalene sulfonate superplasticizer // *Cement and Concrete Research*. 2004. V. 34. P. 1017-1024.
6. Vishal Behl, Vinay Singh, Vijay Dahiya, Ajay Kumar. Characterization of physico-chemical and functional properties of fly ash concrete mix // *Materials today: Proceedings*. 2021. V. 49.
7. Xinyi Shen, Ian C. Bourg. Molecular dynamics simulations of the colloidal interaction between smectite clay nanoparticles in liquid water // *Journal of Colloid and Interface Science*. V.584. P 610-621.
8. ГОСТ 10262-73 Реактивы. Цинка окись. Технические условия. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1973. 19 с.
9. ГОСТ 127.1-93 Сера техническая. Технические условия М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1993. 10 с.
10. ГОСТ 31108-2020 Цементы общестроительные. Технические условия. М.: Стандартиформ, 2020 19 с.
11. ГОСТ 740-76 Тиурам-Д. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 1976. 7 с.
12. ГОСТ 8677-76 Реактивы. Кальция Окись. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 1977. 8 с.
13. Золотухин С.Н., Кукина О.Б., Абраменко А.А., Абраменко А.А., Волков В.В., Еремин А.В. Волокитина А.О. Безобжиговые строительные материалы из отвального фосфогипса / Монография. Воронеж, 2020. 161 с.
14. Золотухин С. Н. К вопросу о структурообразовании и технологии некоторых эффективных композиционных строительных материалов / С. Н. Золотухин // *Строительные материалы*. 1993. № 5. 26 с.
15. Золотухин С.Н. Эффективные карбамидные полимербетоны для животноводческих помещений: дис... канд. техн. наук: 05.23.05 / Золотухин Сергей Николаевич. Воронеж. 1990. 186 с.
16. Золотухин С.Н. Влияние толщины водных пленок на структуру композиционного строительного материала с использование фосфогипса / С.Н. Зо-

лотухин [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. Воронеж, 2017. т. 13, № 4. С. 138-143.

17. Коломникова И.И., Земцов Е.С. Технология изготовления полимербетонов // Научно-практический электронный журнал Аллея Науки. Тамбов, № 2. 2019. 6 с.

18. Мусаева А.Ю. Влияние наполнителя на свойства композиций на основе эпоксидного олигомера. Баку, 2017. 4 с.

19. Нгуен Динь Чинь, Нгуен Тхе Винь, Баженов Ю.М. Высокопрочные бетоны с комплексным применением золы рисовой шелухи, золы-уноса и суперпластификаторов // Вестник МГСУ №1. Москва, №1. 2012. С. 77-82.

20. Петров А.В. Влияние природы полимера, модификации поверхности наполнителя и его дисперсности на межфазное взаимодействие, магнитные и механические свойства полимерных микро- нанокомполитов // Отчет о научно-исследовательской работе. Екатеринбург, 2013. 30 с.

21. Семенов В.Н. Строительных растворы на основе фосфогипса и безобжиговой технологии: дис... канд. техн. наук: 05.23.05 / Семенов Виктор Николаевич. Воронеж, 2002. 144 с.

22. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с Изменениями № 1, 2, 3). М.: Стандартиформ, 2020. 124 с.

23. ТУ 38.103641-98. Полибутадиен низкомолекулярный (ПБН). Технические условия. Москва, 1998.

24. Хунг Нго Суан, Лам Танг Ван, Булгаков Б.Ю., Александрова О.В., Ларсен О.А. Влияние содержания золы-уноса на прочность бетонов на основе сульфатостойкого портландцемента // Промышленной и гражданское строительство. Москва, №1, 2021. С. 51-58.

25. Шмелев Г.Д. Эффективные фосфогипсовые композиции для строительных изделий из многотоннажных техногенных отходов химического производства: дис... канд. техн. наук: 05.23.05 / Шмелев Геннадий Дмитриевич. Воронеж. 1998. 256 с.

26. Борисов Ю.М., Потапов Ю.Б., Барабаш Д.Е., Панфилов Д.В., Поликутин А.Э., Пинаев С.А. Эффективные строительные конструкции на основе композитов специального назначения. Воронеж, 2014. 88 с.

27. Ярцев В.П., Николюкин А.Н., Плужникова Т.М. Современные представления о структурообразовании полимербетонов // Научно-практический электронный журнал Аллея Науки. Тамбов, № 1. 2018. 8 с.

28. СН 525-80 Инструкция по технологии приготовления полимербетонов и изделий из них. М.: Государственный комитет СССР по делам строительства – Москва, 1981. 25 с.

29. ГОСТ 25881-83 Бетоны химически стойкие. Технические условия. М.: Государственный комитет СССР по делам строительства – Москва, 1983. 11 с.

30. ГОСТ 310.4-81 Цементы. Методы предела прочности при изгибе и сжатии. М.: ИПК Издательство стандартов – Москва, 1981. 11 с.

---

**Золотухин Сергей Николаевич** – доцент кафедры строительных конструкций, оснований и фундаментов Воронежского государственного технического университета

**Сафонов Игорь Романович** – студент группы мЭСК-201 строительного факультета Воронежского государственного технического университета

**Винокуров Илья Владимирович** – студент группы мЭСК-201 строительного факультета Воронежского государственного технического университета

**Садыков Сергей Омерович** – старший преподаватель кафедры инженерной и компьютерной графики Воронежского государственного технического университета

**Иващенко Елена Ивановна** – доцент кафедры инженерной и компьютерной графики Воронежского государственного технического университета

## **ПОЛЗУЧЕСТЬ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ КАРБОНАТНЫХ БЕТОНОВ С КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКОЙ**

*В.В. Белов\*, Т.Р. Баркая, П.В. Куляев*

*Тверской государственный технический университет,  
Российская Федерация, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22*

*\*Адрес для переписки: Белов Владимир Владимирович,*

*E-mail: vladim-bel@yandex.ru*

Мелкозернистые карбонатные бетоны – это достаточно востребованный в настоящее время материал, с хорошими показателями по трещиностойкости, морозостойкости, критериям долговечности и надежности строительных материалов и конструкций. Актуальной является задача поиска наиболее экономически и экологически оправданных способов повышения деформативных свойств данного бетона. В статье отражены результаты исследования деформаций мелкозернистых карбонатных бетонов с комплексной добавкой, состоящей из тонкодисперсного известнякового наполнителя и суперпластификатора. Деформации разделяются на условно-мгновенные, краткосрочные и длительные (ползучесть). В исследовании используется метод планирования экспериментов и специальное оборудование, тензодатчики для измерения мгновенных деформаций и индикаторы часового типа для измерения деформаций ползучести. Показано, что комплексная добавка способствует снижению деформаций мелкозернистых карбонатных бетонов и ведет к повышению их долговечности за счет модификации структурообразования и интенсификации процесса гидратации.

*Ключевые слова: мелкозернистые карбонатные бетоны, деформативные свойства, ползучесть, влияние, химические добавки*

## **CREEP OF FINE-GRAINED CARBONATE CONCRETE WITH COMPLEX ADDITIVE**

*V.V. Belov \*, T.R. Barkaya, P.V. Kulyaev*

*Tver State Technical University,  
Russian Federation, 170026, Tver, nab. Af. Nikitina, 22*

*\*Corresponding author: Belov Vladimir Vladimirovich,*

*E-mail: vladim-bel@yandex.ru*

Fine-grained carbonate concretes are a fairly popular material at present, with good indicators for crack resistance, frost resistance, criteria for durability and reliability of building materials and structures. The task of finding the most economically and ecologically justified ways to increase the deformation properties of this concrete is relevant. The article reflects the results of the investigation of deformations of fine-grained carbonate concrete with a complex additive consisting of finely dispersed limestone filler and superplasticizer. Deformations are divided into conditionally instantaneous, short-term and long-term (creep). The study uses a method of planning experiments and special equipment, electric strain gauges for measuring instantaneous deformations and hour-type indicators for measuring creep deformations. It is shown that complex additive contributes to reduction of deformations of fine-grained carbonate concrete and leads to increase of their durability due to modification of structure formation and intensification of hydration process.

*Keywords: fine-grained carbonate concretes, deformation properties, creep, influence, chemical additives*

**Введение.** Важной задачей строительного производства является получение мелкозернистых карбонатных бетонов (МЗКБ) с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Это связано с необходимостью разработки новых составов МЗКБ на разных уровнях воздействия [1, 2]. В МЗКБ присутствует так называемая матрица, состоящая из цементного раствора и различных добавок и жесткого скелета из заполнителя. Снижения уровня деформаций МЗКБ сводится к реализации следующих процессов [3]: выравнивание гидратации за счет более равномерного распределения частиц цемента в объеме МЗКБ; физическое вытеснение воды из воздушных и капиллярных микропор, и частичный перевод ее в гелевую область.

Правильное дозирование, степень дисперсности и технология введения добавок ведут к снижению деформаций МЗКБ, делая их более прочными и стойкими к агрессивным средам [4].

В работах [5, 6, 7] представлены современные исследования МЗКБ с минеральными добавками и влияние разнообразных факторов на его физико-механические свойства. Деформациями ползучести являются не менее важными эксплуатационными характеристиками МЗКБ [8]. На них влияют такие факторы, как водотвердое отношение, размер заполнителя, тонкость помола вяжущего, влажность, возраст бетона к моменту приложения нагрузки, и величина нагрузки [9, 10, 11].

Влияние таких параметров, как структура, состав бетона, процентное содержание пластифицирующих и минеральных добавок освещено в работах, где также отмечается влияние известнякового тонкодисперсного наполнителя на реологические и технологические свойства бетона [12, 13, 14].

Методика оценки долговечности бетонов на композиционном вяжущем рассмотрена в работе [15].

Таким образом, анализ опубликованных работ, как приведенных выше, так и других по данной теме, показывает, что при разработке технологии МЗКБ особое внимание уделяется повышению прочности, морозостойкости, стойкости к циклическим нагрузкам и истиранию (например, при получении дорожных конструкций), что не всегда возможно реализовать при существующих методах проектирования композиций МЗКБ и технологиях производства. Особенно это касается задачи повышения трещиностойкости этих бетонов. Поэтому необходимо совершенствовать научные методы и способы повышения эксплуатационно-технологических свойств МЗКБ, прежде всего их трещиностойкости и долговечности.

Решение этой задачи требует привлечения современных идей по регулированию зернового состава известняков крупной фракции, с регулированием состава МЗКБ за счет использования мелкодисперсного наполнителя из известняка дробильно-сортировочного и пластифицирующих добавок, совместное

применение которых позволяет создать синергетический эффект. Вышеприведенные обстоятельства определяют цели данной работы.

**Модели и методы.** При исследовании ползучести рассматривается кратковременная ползучесть, продолжительность которой  $(t-\tau_0)$  мала по сравнению с возрастом бетона  $\tau_0$ , в котором приложена нагрузка, равном 100 суток.

В этом случае можно принять

$$E(\tau) = E(\tau_0) = E = \text{const.}$$

При постоянном напряжении  $\sigma$

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E} + C\tau_0 \times \sigma \times [1 - e^{-\gamma(t-\tau)}]. \quad (1)$$

Первое слагаемое представляет собой деформацию, развивающуюся в момент приложения нагрузки, независимую от времени [7].

Второе слагаемое представляет собой деформацию ползучести:

$$\varepsilon_{cr} = C\tau_0 \times \sigma \times [1 - e^{-\gamma(t-\tau)}]. \quad (2)$$

Определение деформаций ползучести проводилось на образцах – кубах размером  $100 \times 100 \times 100$  мм. Это вполне согласуется с предыдущими исследованиями по определению деформационных свойств мелкозернистых бетонов, работающих в сложных условиях нагружения [11]. Загрузка образцов осуществлялась поэтапно. Нагрузка на шаг была равной 50 кН. Мгновенные измерения деформации проводились с помощью тензометрического моста Уинстона. Использовался высокоточный электронный гальванометр с разрешением  $10^{-7}$ . Основание тензодатчиков составляло 20 мм. Для компенсации контактных (локальных) напряжений при переносе нагрузки на образец использовалась схема свободной (шарнирной) верхней опоры и неподвижной нижней. Задача состояла в оценке развития мгновенных и длительных деформаций мелкозернистого бетона в двух ортогональных плоскостях. Поэтому были использованы два тензометрических датчика (в вертикальной и горизонтальной осях на каждой грани).

Фактическое значение сжимающей нагрузки на образец, в кН, устанавливалось динамометром.

Для исследования деформаций ползучести был использован следующий метод. Для испытаний использовались рамки, но измерительными приборами были часовые индикаторы и динамометр (рис. 1).

Деформационные свойства МЗКБ контролируются на трех уровнях: микроуровне, мезо- и макроуровне. Эти уровни отражают особенности взаимодействия структурообразующих элементов в мелкозернистом карбонатном бетоне, которые влияют, в том числе, и на деформационное поведение МЗКБ.

Одним из способов уменьшения деформаций ползучести является создание однородной и компактной бетонной конструкции. Этому способствует создание контактной структуры уплотненного типа, с минимальным количеством пустот, а также введение в бетонную конструкцию известнякового микронаполнителя.

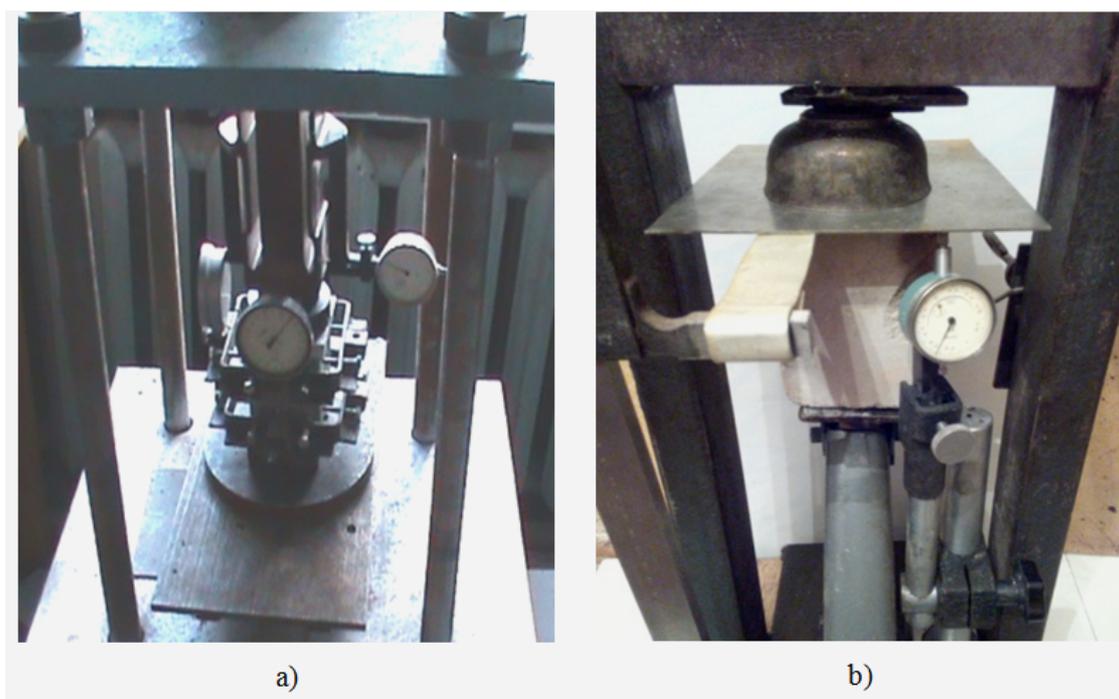


Рис. 1. Тензометрические приборы с электрическими датчиками, метрической линейкой, нивелирующей планкой со шкалой, динамометрами и часовыми индикаторами для оценки деформаций кратковременной и мгновенной (а) и кратковременной и длительной (б) ползучести

Заполнитель в работе был оптимизирован по формуле Функа-Дингера в соответствии с табл. 1. Расходы фракций на  $1 \text{ м}^3$  смеси приведены в табл. 2.

Таблица 1

Сита, частные и полные остатки согласно распределению Функа-Дингера для известнякового заполнителя

№	Сита, мм	Част. остаток, г	Част. остаток, %	Полн. остаток, %	Полн. проход, %
7	10	0	0	0	100
6	5	227	33,4	33,4	66,6
5	2,5	161	23,7	57,1	42,9
4	1,25	116	17,1	74,2	25,8
3	0,63	80	11,8	86	14
2	0,315	58	8,5	94,5	5,5
1	0,16	38	5,6	100	0

Таблица 2

Расход заполнителя на 1 м<sup>3</sup> смеси

№	Фракция, мм	Расход, кг/м <sup>3</sup>
6	5	511
5	2,5	362,4
4	1,25	261,1
3	0,63	180,1
2	0,315	129,1
1	0,16	85,6

При получении микрозаполнителя, известняковую крошку измельчали в шаровой мельнице до удельной поверхности около 500 м<sup>2</sup>/кг и добавляли в смесь в качестве заменителя основного вяжущего в количестве до 50 мас.% (цемент).

При анализе влияния ингредиентов компонентов на деформации ползучести МЗКБ был использован метод трехфакторного планового эксперимента типа В-D13 для соответствующей матрицы из десяти вариантов приготовления смеси МЗКБ. Входными переменными были  $x_1$  – отношение микрозаполнителя из известняка к цементу (%),  $x_2$  – отношение суперпластификатора СП - 1 к цементу,  $x_3$  – процентное содержание частиц диаметром 0,08 мм в микрозаполнителе известняка. В качестве функций отклика исследованы мгновенные деформации кубических образцов размером 100×100×100 мм. Было испытано 15 об-

разцов (пять из десяти смесей были специально подобраны для испытаний на ползучесть)-кубики размером 100×100×100 мм – по 3 образца для каждого из пяти вариантов состава смеси (табл. 3). Образцы затвердевали в естественных условиях. Пластичность смеси контролировалась распространением стандартного конуса. Для каждого состава было выбрано водотвердое отношение в соответствии с распылом на встряхивающем столе, равным 110 мм.

**Результаты исследования и их анализ.** По методу планирования экспериментов получилось следующее регрессионное уравнение для мгновенных деформаций и соответствующие ему диаграммы:

$$Y=295,9+63,51x_1-9,3x_2+10,12x_3+378,5x_1^2-158,5x_2^2-153,2x_3^2-92,9x_1x_2-67,49x_1x_3+106,85x_2x_3. \quad (3)$$

**Таблица 3**

Расходы компонентов смеси на 1 м<sup>3</sup> МЗКБ

№ состава	Вяжущая часть, кг	Заполнитель, кг	Цемент, кг	Известняк, кг	СП, кг
1	672	1528	672	0	6,72
2	672	1528	336	336	0
3	672	1528	472	200	0
4	672	1528	472	200	2,11
5	672	1528	553	119	4,15

Графики зависимостей (рис. 2) показывают влияние количества известнякового микрозаполнителя и суперпластификатора СП-1 в вяжущей части на мгновенные деформации МЗКБ. Минимум деформаций отмечается при содержании известняка в количестве 17-25% от массы вяжущего, а при превышении 30% деформации бетона возрастают, достигая предельных значений при содержании суперпластификатора СП-1 в количестве 4-5% от массы твердой части вяжущего.

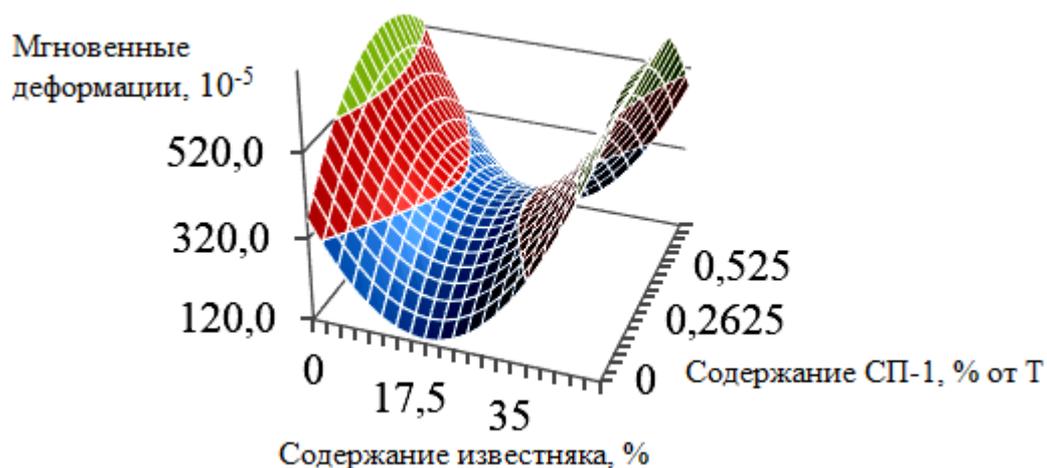


Рис. 2. Зависимость мгновенных деформаций от процентного содержания суперпластификатора СП-1 и наполнителя в процентах в составе модели FGCC:  
 $Y=3,1x^2-6,6x+46,7$

Составы МЗКБ, для которых проведены эксперименты на кратковременную ползучесть, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Составы бетонов

Номер состава	Состав бетона
1	В/Ц=0,34, И/Ц=0%, СП-1=1%
2	В/Ц=0,45, И/Ц=50%, СП-1=0%
3	В/Ц=0,39, И/Ц=17,8%, СП-1=0,75%
4	В/Ц=0,41, И/Ц=50%, СП-1=0,75%
5	В/Ц=0,46, И/Ц=30%, СП-1=0,75%

Номера составов и соответствующие расчетные значения мер линейной ползучести бетона приведены в табл. 5.

Таблица 5

Номера составов и соответствующие расчетные значения мер линейной ползучести бетона

Номер состава	В/Ц	И/Ц	СП, % от Ц	$C_{cr}(28)_{расч}$
1	0,45	50	0	7,5E-05
2	0,34	0	1	4E-05
3	0,46	30	0,75	7,7E-05
4	0,39	17,8	0,75	4,2E-05
5	0,41	50	0,75	6E-05

Номера составов и экспериментальные значения меры линейной ползучести  $C_{\tau 0}$  и  $\sigma$  приведены в табл. 6.

Номера составов, соответствующие им расчетные зависимости, теоретические  $C_{cr, теор}$  и экспериментальные  $C_{cr, эксп}$  значения меры линейной ползучести бетона даны в табл. 7.

**Таблица 6**

Номера составов и экспериментальные значения меры линейной ползучести  $C_{\tau 0}$

Состав	$C_{\tau 0} \times \sigma$	$C_{\tau 0}, \text{МПа}^{-1}$
1	$18,8 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$
2	$80 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$
3	$39 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$
4	$11 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
5	$37 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-5}$

**Таблица 7**

Номера составов, соответствующие им приближенные расчетные зависимости, теоретические  $C_{cr, теор}$  и экспериментальные  $C_{cr, эксп}$  значения меры линейной ползучести бетона

Состав	$C_{cr, эксп}$	$C_{cr, теор}$
1	$2,8 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-5}$
2	$4 \times 10^{-5}$	$7,5 \times 10^{-5}$
3	$3 \times 10^{-5}$	$4,2 \times 10^{-5}$
4	$1 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-5}$
5	$2,5 \times 10^{-5}$	$7,7 \times 10^{-5}$

Полученные математические модели позволяют оптимизировать расход микронаполнителя и суперпластификатора по технологическим и эксплуатационным свойствам и проектировать бетоны с пониженным уровнем мгновенных, кратковременных и длительных деформаций. Минимум мгновенных деформаций регистрируется при содержании микронаполнителя в бетоне около 18-22% (рис. 2), при котором между заполнителем и вяжущим образуется более плотная и однородная композитная структура с вязким гелевым компонентом и жестким каркасом заполнителя, обеспечивающая улучшенные эксплуатационные характеристики бетона, с повышенной трещиностойкостью и сниженными значениями деформаций. Совместное применение мелкодисперсного наполни-

теля и суперпластификатора выявляет синергетический эффект, обусловленный улучшением адсорбции частиц комплексной добавки на частицах цемента и повышением адгезии зерен заполнителя, цемента и добавки при твердении бетона. Данные вышеприведенных экспериментов показывают, что мелкодисперсный известняковый наполнитель связывает свободную влагу при твердении бетона, что способствует снижению деформаций МЗКБ.

**Выводы.** Теоретические и экспериментальные значения меры линейной ползучести существенно различаются для составов МЗКБ с добавлением известняка и суперпластификатора, испытанных в возрасте 100 суток. Наличие мелкой фракции известняка влияет на снижение деформаций ползучести. Этот эффект более выражен для композиций с мелкодисперсным известняковым компонентом в вяжущем до 30% и суперпластифицирующей добавкой СП-1 в количестве 0,75% от вяжущего. При затвердевании бетона заполнитель вместе с суперпластификатором СП-1 способствует укреплению зоны контакта цементного камня с заполнителем. В этом случае между наполнителем и связующим образуется более прочная композитная структура. Это снижает уровень длительных деформаций ползучести в среднем на 80%, что способствует росту эффективности и повышению как физико-механических свойств МЗКБ, так и увеличению его ранней прочности в среднем на 30%. В дальнейшем предполагается провести исследования по изучению поведения МЗКБ на различных уровнях упрочнения структуры, нагружения и деформаций ползучести, а также с различными видами пластификаторов в составе комплексной добавки.

### **Список литературы**

1. Белов В.В. Новые принципы определения состава высококачественного бетона / В.В. Белов, М.А. Смирнов // Вестник Тверского государственного технического университета. Вып. 13 / Тверской гос. техн. ун-т. Тверь, 2008. С. 341-346.

2. Низина Т.А. Мелкозернистые дисперсно-армированные бетоны на основе комплексных модифицирующих добавок / Т.А. Низина, А.Н. Пономарев, А.С. Балыков // *Строительные Материалы*, 2016. С. 68-72.

3. Бердов Г.И., Ильина Л.В., Зырянова В.Н., Никоненко Н.И., Мельников А.В. Повышение свойств композиционных строительных материалов введением минеральных микронаполнителей // *Стройпрофи: Строительные Технологии и Бетоны №2*, 2012. С. 26-30.

4. Плугин А.А. Применение карбонатных добавок в цементных составах для гидроизоляционных и реставрационных работ зданий и сооружений / А.А. Плугин, Т.А. Костюк, М.Г. Салия Д.А. Бондаренко // *Сборник научных трудов института строительства и архитектуры МГСУ*, 2012. С. 224-227.

5. Schutter G.De. Effect of limestone filler as mineral addition in self compacting concrete/ Belgium Magnel laboratory of concrete research/36 Conference on Our World in concrete & Structures, Singapore, 14-16/08/2011.

6. Коротких Д.Н. Определяющие соотношения показателей сопротивления разрушению цементных бетонов и параметров их структуры / Чернышов Е.М., Коротких Д.Н. // *Воронеж: ГАСУ, Строительство и реконструкция, Новосибирск*, 2015. С. 167-174.

7. Максимова И.Н. Комплексная оценка параметров качества структуры и механики разрушения цементного камня/ И.Н. Максимова, В.Т. Ерофеев, Н.И. Макридин, Ю.В. Полубарова // *Пензенский государственный университет архитектуры и строительства Известия Высших Учебных Заведений. Строительство* Издательство: Новосибирский ГАСУ (Сибстрин) (Новосибирск). 2015. С. 14-22.

8. Белов В.В. Прочностные и деформативные свойства бетонов с карбонатными микронаполнителями/ В.В. Белов, С.Л. Субботин, П.В. Куляев// *НТП Журнал «Строительные Материалы»*, март, 2015. С. 25-28.

9. Балыков А.С. Разработка составов высокопрочных мелкозернистых бетонов на природном и техногенном заполнителях и критериев оценки их эффективности /А.С. Балыков, Т.А Низина, Л.В. Макарова // *Национальный исслед-*

довательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Высокопрочные Цементные Бетоны: Технологии, Конструкции, Экономика (ВПБ-2016), 2016. С. 19.

10. Chaid R., Jauberthie1 R. et Boukhaled A. Effet de l'ajoutcalcairesur la durabilite des betons/Lebanese Science Journal, Vol. 11, No. 1, 2010.

11. Desnerck Pieter, Schutter Geert De, Taerwe Luc. Stress-strain behavior of self-compacting concretes containing limestone fillers// Ernst &Sohn, Structural concrete 13, N2, Berlin, 2012.

12. Хозин В.Г., Сибгатуллин И.Р., Хохряков О.В., Красникова Н.М. Производство ЦНВ из техногенных отходов – эффективный путь решения экологических и сырьевых проблем // Казань ГАСУ, Строительные материалы и изделия, 2012. С. 190-192.

13. Лесовик В.С. Управление структурообразованием строительных композитов/ В.С. Лесовик, И.Л. Чулкова// Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия. Омск. 2011. С. 74

14. Лесовик В.С. Использование композиционных вяжущих для повышения долговечности бетонной брусчатки/ В.С. Лесовик, М.С. Агеева, Ю.В. Денисова, А.В. Иванов// Вестник Белгородского государственного технологического университете им. В.Г. Шухова. №4, 2011. С. 52-54.

15. Ерофеев В.Т. Методика прогноза механических параметров бетонов методом численного моделирования / В.Т. Ерофеев, П.С. Ерофеев, А.И. Меркулов, Е.А. Митина, И.Н. Максимова, Д.А. Меркулов. //Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Материалы XXI международного симпозиума имени А.Г. Горшкова. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Москва, 2015. С.29-31.

## References

1. Belov V.V. New principles for determining the composition of high-quality concrete/V.V. Belov, M.A. Smirnov//Bulletin of the Tver State Technical University. - Out. 13/Tver State Techn. techn. un-t. Tver, 2008. С. 341-346.
2. Nizina T.A. Fine-grained dispersed-reinforced concrete based on complex modifying additives/T.A. Nizina, A.N. Ponomarev, A.S. Balykov//Construction Materials, 2016. P. 68-72.
3. Berdov G.I., Ilyina L.V., Zyryanova V.N., Nikonenko N.I., Melnikov A.V. Improving the properties of composite construction materials with the introduction of mineral micro-fillers//Stroyprofi: Construction Technologies and Concretes No. 2, 2012. P. 26-30.
4. Plugin A.A. Use of carbonate additives in cement compositions for waterproofing and restoration work of buildings and structures/A.A. Plugin, T.A. Kostyuk, M.G. Salia D.A. Bondarenko//Collection of scientific works of the Institute of Construction and Architecture of Moscow State University, 2012. P. 224- 227.
5. Schutter G. De. Effect of limestone filler as mineral addition in self compacting concrete/Belgium Magnel laboratory of concrete research/36 Conference on Our World in concrete & Structures, Сингапур, 14-16/08/2011.
6. Short D.N., PredelyusheniysheniySPOSU, Construction reconstruction, Novosibirsk, 20120 of, Cement concrete and parametrical structures / Chernyshov E.M., Short D.N.//167-174.
7. Maximova I.N. Complex parametrical kachestovy structure and mechanical splitting of a cement stone / I.N. Maximova, V.T. Erofeyev, N.I. Makridin, Yu.V. Polubarova//the Penza state university of architecture and construction - news Building: Novosibirsk GASU (Sibstrin) (Novosibirsk) of.2015. P. 14-22.
8. Belov V.V. Strength and deformation properties of concrete with carbonate micro-fillers/V.V. Belov, S.L. Subbotin, P.V. Kulyaev//NTP Journal «Construction Materials», March, 2015.P. 25-28.

9. Balykov A.S. Development of compositions of high-strength fine-grained concrete on natural and technogenic fillers and criteria for evaluation of their efficiency/Ampere-second. Balykov, T.A Nizina, L.V. Makarova//National research Mordovian state university of N.P. Ogarev, High-strength Cement Concrete: Technologies, Designs, Economy (VPB-2016), 2016. P. 19.
10. Chaid R., Jauberthie1 R. et A. Boukhaled.Effet de l'ajoutcalcairesur la durabilite des betons/Lebanese Science Journal, Vol. 11, No. 1, 2010.
11. Desnerck Pieter, Geert De Schutter, Luc Taerwe. Stress-strain behavior of self-compacting concretes containing limestone fillers// Ernst &Sohn, Structural concrete 13, N2, Berlin, 2012.
12. Khozin V.G., Sibgatullin I.R., Khokhryakov O.V., Krasinikova N.M. Production of CNV from man-made wastes is an effective way to solve environmental and raw material problems//KazANGASU, Construction materials and products, 2012. P. 190-192.
13. Lesovik V.S. Structure Management of Building Composites/V.S. Lesovik, I.L. Chulkova//Siberian State Automobile and Road Academy .//Omsk. 2011. P. 74
14. Lesovik V.S. Using composite binders to increase the durability of concrete paving stones/V.S. Lesovik, M.S. Ageeva, Yu.V. Denisova, A.V. Ivanov//Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. NO. 4, 2011. P. 52-54.
15. Erofeev V.T. Method of prediction of mechanical parameters of concretes by the method of numerical modeling/V.T. Erofeev, P.S. Erofeev, A.I. Merkulov, E.A. Mitina, I.N. Maksimova, D.A. Merkulov .//Dynamic and Technological Problems of Mechanics of Structures AND Moscow Aviation Institute (National Research University). Moscow, 2015. P. 29-31.

---

**Белов Владимир Владимирович** – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой производства строительных изделий и конструкций Тверского государственного технического университета  
**Баркая Темур Рауфович** – канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой конструкций и сооружений Тверского государственного технического университета  
**Куляев Павел Викторович** – канд. техн. наук, доцент кафедры конструкций и сооружений Тверского государственного технического университета

УДК 691.5

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВОВ ГИПСОВЫХ СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ,  
МОДИФИЦИРОВАННЫХ ДОБАВКАМИ ТЕХНОГЕННОГО  
ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕСТНОЙ СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ**

*В.Б. Петропавловская\*<sup>1</sup>, М.Ю. Завадько<sup>1</sup>, Т.Б. Новиченкова<sup>1</sup>,  
К.С. Петропавловский<sup>1</sup>, А.Ф. Бурьянов<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Тверской государственный технический университет,  
Российская Федерация, 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, 22*

*<sup>2</sup>Московский государственный строительный университет,  
Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26*

*\*Адрес для переписки: Петропавловская Виктория Борисовна,*

*E-mail: victoria\_petrop@mail.ru*

В работе рассмотрены преимущества многокритериального проектирования сырьевых смесей на гипсовом вяжущем. Проанализированы тенденции и проблемы на рынке сухих строительных смесей в России. Осуществлен анализ отечественной и зарубежной литературы, на основании которого приведена наиболее оптимальная схема проектирования составов смесей на гипсовом вяжущем с точки зрения экономического эффекта. Как правило, существенного экономического эффекта при производстве смесей и повышения их конкурентоспособности позволяет достичь применение компонентов местной сырьевой базы, а также предварительное планомерное проектирование составов исходя из их характеристик. Предложены оптимальные составы гипсовых сухих строительных смесей с применением компонентов техногенного происхождения местной сырьевой базы Тверской области. Ввиду необходимости устранять нежелательные побочные эффекты одних компонентов, входящих в состав, другими, в случае с применением техногенных компонентов, как ресурсов местной сырьевой базы, в составах, отмечены перспективы применения полифункциональных добавочных комплексов.

---

© Петропавловская В.Б., Завадько М.Ю., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С., Бурьянов А.Ф., 2022

*Ключевые слова: гипсовые смеси, минеральные добавки, химические добавки, отходы, техногенный базальт, зола ТЭЦ, карбонизация*

**DESIGN OF COMPOSITIONS OF GYPSUM RAW MIXTURES MODIFIED  
WITH ADDITIVES OF MAN-MADE ORIGIN ON THE BASIS OF LOCAL  
RAW MATERIAL BASE**

*V.B. Petropavlovskaya\*<sup>1</sup>, M.Y. Zavadko<sup>1</sup>, T.B. Novichenkova<sup>1</sup>,  
K.S. Petropavlovskii<sup>1</sup>, A.F. Buryanov<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Tver State Technical University,*

*Russian Federation, 170026, Tver, A. Nikitinemb, 22*

*<sup>2</sup>Moscow State University of Civil Engineering,*

*Russian Federation, 129337, Moscow, Yaroslavskoe Shosse, 26*

*\*Corresponding author: Victoria B. Petropavlovskaya,*

*E-mail: victoria\_petrop@mail.ru*

The paper considers the advantages of the production and use of building materials and products based on gypsum binder, in particular dry building mixes for various purposes. Trends and problems in the market of dry building mixes in Russia are analyzed. The analysis of domestic and foreign literature is carried out, on the basis of which the most optimal design scheme for the composition of mixtures on gypsum binder from the point of view of economic effect is given. As a rule, the use of components of the local raw material base, as well as the preliminary planned design of compositions based on their characteristics, allows achieving a significant economic effect in the production of mixtures and increasing their competitiveness. Optimal compositions of gypsum dry building mixes with the use of components of technogenic origin of the local raw material base of the Tver region are proposed. In joints, prospects for the use of multifunctional additive complexes are noted.

*Keywords: dry building mixes, mineral additives, chemical additives, waste, technogenic basalt, fuel ash, carbonization*

**Введение.** Природный гипсовый камень, как известно, использовался человеком при строительстве жилищ и сооружений еще с древних времен. Согласно археологическим раскопкам гипс начал успешно применяться людьми еще за 9 тыс. лет до н.э., в виде растворов (вяжущего) совместно с известью за 5 тыс. лет до н.э. [1].

В российской и международной практике отмечается уникальность гипсового камня, позволяющая использовать его в качестве исходного вещества в технологиях и производстве материалов и изделий высокого качества для целого ряда отраслей. На сегодняшний день гипсовый камень высоко ценится и успешно применяется на рынке строительных материалов [1, 2]. Гипсовые отделочные материалы, благодаря склонности к абсорбции влаги из воздуха, способны регулировать влажностный режим в помещениях и делать его комфортнее для обитателей жилища. К тому же производство гипсового вяжущего предполагает низкотемпературную обработку, т.е. технология мало энергозатратна в сравнении с производством портландцемента [1], что также повышает его конкурентоспособность среди минеральных вяжущих веществ. Одними из крупнейших месторождений, в которых ведется добыча камня, поставляемого на рынок ведущими производителями гипсового вяжущего, являются Новомосковское и Шедокское месторождения.

Однако Россия обладает не только большим количеством гипсовых месторождений, но и неограниченными запасами гипсосодержащих отходов (фосфогипс, борогипс, хлорогипс, феррогипс, тартарогипс и др.), что делает данный вид вяжущего достаточно доступным [3-6].

За последние 10 лет наблюдается стремительный рост качества материалов и изделий на гипсовом вяжущем и постепенное их внедрение в более широкие области применения. Способность этого вида вяжущего быстро твердеть и набирать прочность делает его привлекательным и для многих передовых на сегодняшний день технологий, например, 3D печати [6-11].

Однако стоит отметить, что доступность сырья и описанные преимущества этого вида вяжущего, все еще не способны обеспечить повсеместно его

применение ввиду получаемых невысоких эксплуатационных характеристик материалов и изделий на его основе, связанных в первую очередь с особенностями структурообразования гипсового камня [12-14].

Повысить необходимые эксплуатационные характеристики материалов и изделий на основе гипсового вяжущего позволяет многокритериальное проектирование композиций на разных уровнях, обоснованное исходя из особенностей каждого компонента системы [15-17]. На рис. 1 наглядно показаны зависимости, в первую очередь – основных физико-механических характеристик гипсовых смесей от влияния тех или иных веществ в качестве модифицирующих компонентов в вяжущей системе на основе полуводного гипса.

Исходя из назначения состава (необходимости получить ряд эксплуатационных и качественных параметров определенного уровня) выбирается необходимый путь проектирования, целенаправленно обеспечивающий эти наиболее значимые характеристики [18].

Конечно, тот или иной путь проектирования определяется также доступностью и экономической целесообразностью применения каждого компонента, в случае необходимости обеспечения определенной характеристики выбор делается в пользу компонента требующего наименьших затрат.

Стоит также отметить перспективы применения полифункциональных добавочных комплексов, внимание на которые было обращено еще В.Б. Ратиновым и Т.И. Розенбергом – одними их основоположников классификации добавок, ранжированными ими, исходя из оказываемого влияния добавок на основные вяжущие в твердеющей системе [19].

Данная работа была направлена на получение гипсовых составов с повышенными физико-механическими характеристиками по энерго- и ресурсосберегающим технологиям посредством комплексного подхода к проектированию, а также применения ресурсов местной сырьевой базы в виде техногенного базальта и золы гидроудаления ТЭЦ.

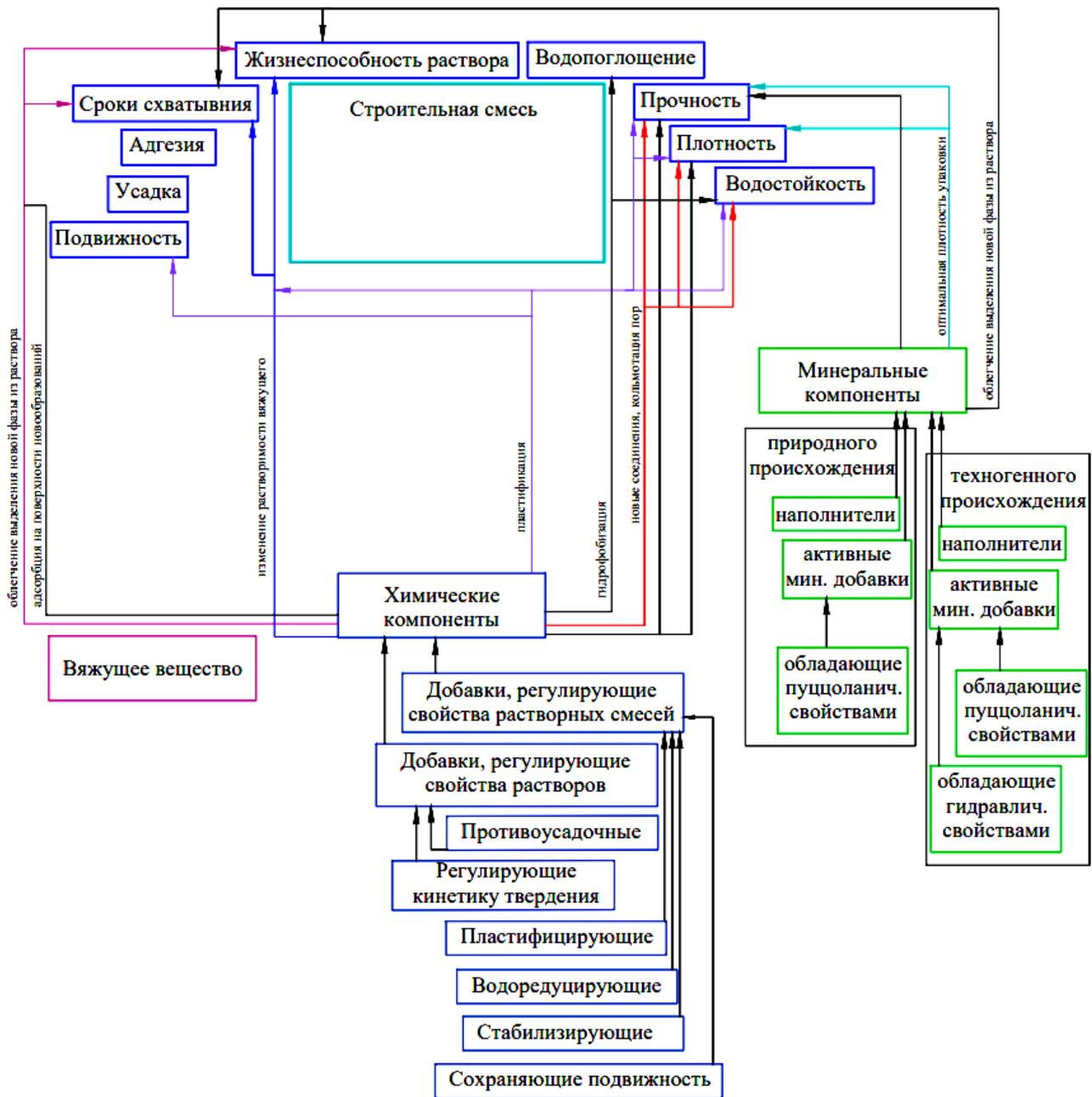


Рис. 1. Общая схема многокритериального проектирования гипсовых смесей

**Экспериментальная часть.** В качестве основного компонента разрабатываемых сырьевых смесей применялось гипсовое вяжущее марки Г-4 (Самарский гипсовый комбинат) по ГОСТ 125-2018 «Вяжущие гипсовые. Технические условия».

Также в исследованиях применялись в качестве компонентов комплекса минеральных и химических добавок:

- известь гашеная (Угловский известковый комбинат, Новгородская обл.) по ГОСТ 9179-2018 «Известь строительная. Технические условия»;
- зола ТЭЦ с фракцией до 0,1 мкм (топливная зола гидроудаления Тверской обл.);
- техногенный базальт (пыль с фильтров пылеочистки производства в Тверской обл. со средней фракцией 150 мкм);
- пластификатор поликарбоксилатный Freeplast (Россия, г. Омск);
- компенсатор усадки Sitren PSR 100 (Evonik, Германия);
- антивспениватель Vinapor DF 9010 F (BASF Construction Additives, Германия);
- винная кислота (Россия) по ГОСТ 21205-83.

В качестве затворителя при получении растворов применялась питьевая вода по ГОСТ 23732–79 «Вода для бетонов и растворов. Технические условия».

В работе были выполнены исследования влияния добавок базальта, топливной золы, извести, а также условий твердения (карбонизации) на основные свойства модифицированной структуры гипсового камня.

В целях исследования совместного влияния комплекса минеральных добавок для определения их оптимального содержания в составе гипсовых композиций применялось математическое планирование экспериментов. В качестве варьируемых факторов назначались процентное содержание базальта/ золы и гашеной извести. В качестве выходных параметров были назначены предел прочности и средняя плотность камня на 7 сутки твердения.

**Результаты и их обсуждение.** На первом этапе было получено оптимальное содержание техногенного базальта в составе гипсовой смеси, которое составило 10 % от массы гипсового вяжущего. На втором – экспериментальным путем было получено оптимальное содержание в составе смесей золы ТЭЦ – 7 % (рис.2).

По результатам проведения статистической обработки экспериментальных данных была получена следующие регрессионные модели, где (1) – для первого этапа исследований, (2) – для второго:

$$Y(RСЖ)=F(X_1,X_2)=9,902-0,276 \cdot X_1-0,140 \cdot X_2-0,798 \cdot X_{12}+0,175 \cdot X_{22}-0,693 \cdot X_1 \cdot X_2, \quad (1)$$

$$Y_1(RСЖ)=F(X_1,X_2)=8,95286+0,34068 \cdot X_1+0,02672 \cdot X_2+0,33953 \cdot X_{12}+0,495 \cdot X_{22}-0,62047 \cdot X_1 \cdot X_2. \quad (2)$$

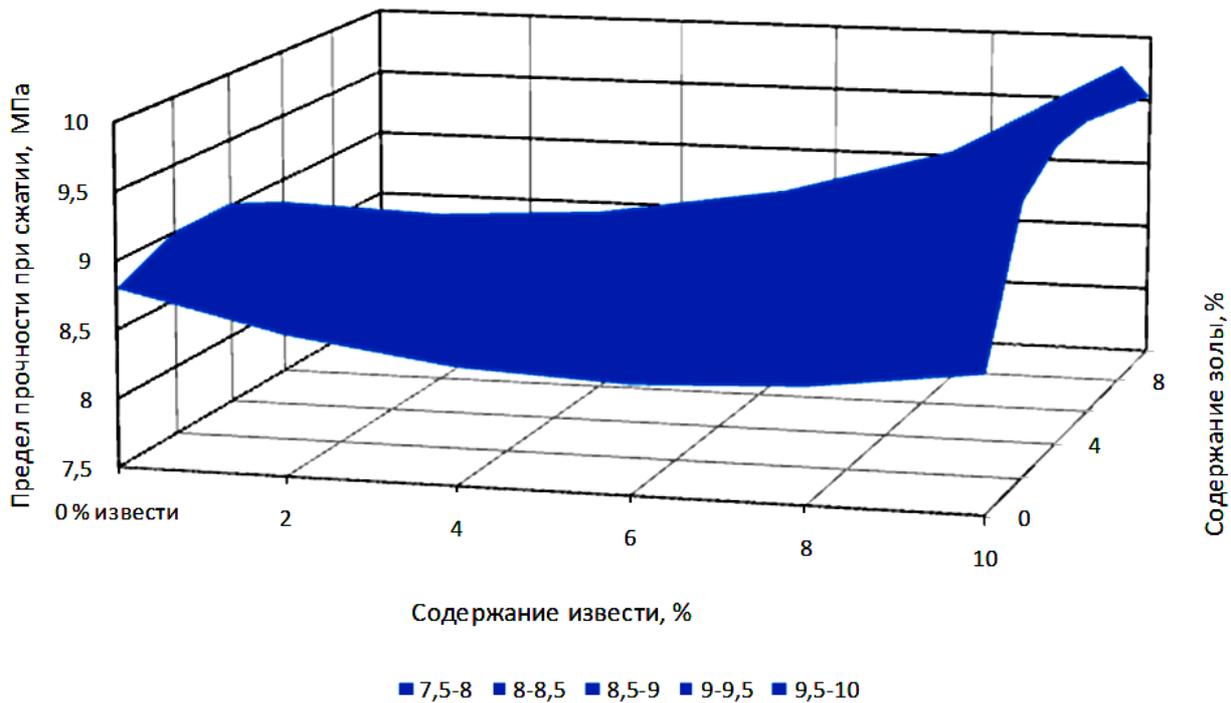


Рис. 2. Влияние добавки золы на прочность модифицированной структуры гипсового камня

В целях повышения реакционной способности техногенного базальта были также проведены исследования по влиянию гашеной извести на модифицированные гипсовые композиты, а также оценка влияния предварительной активации базальта. С позиций физико-механических характеристик исследования показали, что повышается эффективность предварительного измельчения базальта при его измельчении до среднего размера частиц – 55 мкм (прирост прочности составил 15 %), в то время как введение гашеной извести в количестве 5 % обеспечило прирост прочности на 10 %. Полученные базовые минеральные составы для гипсовых смесей, полученные в ходе проведения исследо-

ваний, показаны в табл. 1, основные характеристики составов приведены в табл. 2.

На третьем этапе исследований были подобраны химические компоненты, обеспечивающие необходимые эксплуатационные характеристики составов гипсовых смесей. Наиболее оптимальный состав смеси для применения в качестве отделочного материала для выравнивания полов (в % по массе) представлен в табл. 3, при этом базовый состав минеральной части гипсовой смеси может варьироваться согласно табл. 1.

Кроме этого, в целях упрочнения структуры гипсового камня, содержащего гашеную известь, проводились исследования по его модификации путем принудительной карбонизации в среде углекислого газа, что позволило бы в дальнейшем повысить эксплуатационные характеристики гипсовых строительных изделий, получаемых на базе такого минерального состава.

**Таблица 1**

Предлагаемы базовые минеральные составы

№	Гипсовое вяжущее Г-4, г	Базальт техногенный, г	Базальт техногенный молотый, г	Зола ТЭЦ, г	Известь гашеная, г
1	100	10	0	0	0
2	100	0	10	0	0
3	100	10	0	7	0
4	100	10	0	7	5

**Таблица 2**

Характеристики предлагаемых базовых минеральных составов

№	Прочность при сжатии, МПа (7 сут.)	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Водопоглощение, %	Открытая пористость, %
1	8,7	952,2	25,5	47,6
2	10	979,2	25,5	40,0
3	9,1	970,0	25,5	44,1
4	9,5	973,5	25,2	41,7

Выдерживание в течение 7 суток в среде углекислого газа позволяет повысить прочность гипсового камня 4 состава еще на 32 %. Однако, для выявления наиболее оптимальных режимов выдерживания изделий и разработки тех-

нологических режимов исследования в данном направлении необходимо продолжить.

**Таблица 3**

Состав сухой строительной смеси для выравнивания полов

Компонент сухой строительной смеси	Количество, % по массе
Базовый минеральный состав сухой строительной смеси (в соответствии с таблицей 1)	57,34-73,13
Платификатор на поликарбонатной основе Freeplast	0,06-0,20
Антивспениватель Vinapog	0,09-0,10
Винная кислота	0,01-0,03
Компенсатор усадки Sitren	0,03-0,35

**Заключение.** В работе рассмотрены возможности применения местной сырьевой базы для производства гипсовых смесей. Осуществлен краткий обзор подходов к их проектированию, проведена систематизация информации, на основании которой проведены исследования и предложены базовые минеральные составы гипсовых композиций. Кроме этого, представлены составы гипсовых смесей, предназначенных для выравнивания полов, с применением ресурсов местной сырьевой базы (в том числе техногенных отходов), обеспечивающие суммарный экономический эффект при производстве 1 тонны в 5,3-9,5 тыс. рублей, а также следующие эксплуатационные характеристики: предел прочности при сжатии на 28 сутки твердения – 18-23 МПа, предел прочности при изгибе на 28 сутки твердения – 8-9,5 МПа, водопоглощение – 20 %, время до начала схватывания – 35-45 минут, усадка после высыхания – менее 0,1, поверхность получаемого пола не содержит дефектов и пузырьков воздуха, трещины не возникают. Таким образом, результатами исследований была обоснована возможность и эффективность применения веществ техногенного происхождения на основе местной сырьевой базы, в частности – техногенных базальтов и кислых зол ТЭЦ.

Работа проведена в рамках гранта Российского научного фонда (проект №21-79-30004).

### Список литературы

1. Чернышева Н.В. Водостойкие гипсовые композиционные материалы с применением техногенного сырья / Н.В. Чернышева, В.С. Лесовик, М.Ю. Дребезгова // Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2015. 320 с.
2. Золотухин С.Н. Экологические проблемы строительной отрасли и пути их решения / С.Н. Золотухин, О.Б. Кукина, В.В. Волков, А.Н. Цыплаков // Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий. Сборник материалов X Международной научно-практической конференции. 2021. С. 49-68.
3. Алфимова Н.И. Обзорный анализ способов получения вяжущих из гипсосодержащих отходов промышленных производств /Н.И. Алфимова, С.Ю. Пириева, М.Ю. Елистраткин, Н.И. Кожухова, А.А. Титенко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2020. № 11. С. 8-23.
4. Комаров М.А. Синтез дигидрата сульфата кальция из техногенного сырья / М.А. Комаров, Н.Г. Короб, В.И. Романовский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2020. № 16. С. 76-82.
5. Фоменко А.И. Свойства фосфогипса как техногенного сырьевого ресурса для производства сухих строительных смесей / А.И. Фоменко // В сборнике: Приоритетные направления исследований в рамках естественных и технических наук в XXI веке. Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. Под общей редакцией Е.П. Ткачевой. 2018. С. 234-237.
6. Безногова О.Ю. Модификация состава вяжущего для 3D-печати / О.Ю. Безногова, О.В. Азовцева, Е. Н. Потапова // Успехи в химии и химической технологии. 2021. Т. 35. № 14(249). С. 10-12.

7. Lesovik V. Optimization of fresh properties and durability of the green gypsum-cement paste / Lesovik V., Chernysheva N., Fediuk R., Amran M., Murali G., de Azevedo A.R.G. // *Construction and Building Materials*. 2021. Т. 287. P. 123035.

8. Чернышева Н.В. Состав и реологические свойства формовочных смесей на композиционном гипсовом вяжущем / Н.В. Чернышева, В.С. Лесовик, М.Ю. Дребезгова [и др.] // *Строительные материалы*. 2021. № 8. С. 45-52. DOI 10.31659/0585-430X-2021-794-8-45-52.

9. Чернышева Н.В. Композиционные гипсовые вяжущие для поризованных композитов в технологии строительной печати / Н.В. Чернышева, С.В. Шаталова, С.В. Масалитина // *Университетская наука*. 2021. № 1(11). С. 91-94.

10. Glagolev E.S. Compounding Features of Special Molding Mixes for 3D Printing Technology / E.S. Glagolev, N.V. Chernysheva, V. S. Lesovik, E.N. Leshchenko // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 147. P. 250-257. DOI 10.1007/978-3-030-68984-1\_37.

11. Drebezgova M.Y. Architectural design of residential modules using additive technologies / M.Y. Drebezgova, N.V. Chernysheva, V.A. Klimenko, A.V. Olishov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Scientific Conference on Construction and Architecture: Theory and Practice for the Innovation Development 2019, CATPID 2019, Kislovodsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 033007. DOI 10.1088/1757-899X/698/3/033007.*

12. Yakovlev G.I. Structure and properties of modified gypsum binder/ G.I. Yakovlev, A. Gordina, R. Drochytka, O. Smirnova, A.F. Buryanov// *Smart and Sustainable Built Environment* 10(4):702-710DOI: 10.1108/SASBE-04-2020-0037.

13. Petropavlovskaya V. Role of basalt dust in the formation of the modified gypsum structure/ V. Petropavlovskaya, M. Yu. Zavad'Ko, K. Petropavlovskii, A. Pustovgar, A.F. Buryanov, T. Novichencova// *Web of Conferences* 97(1):02036. DOI: 10.1051/e3sconf/20199702036

14. Bessonov Yu. Gypsum Polymer Materials in Construction/ Yu. Bessonov, A. Zhukov, B. Efimov, I. Govryakov, E. Gorbunova // *XIV International Scientific Conference «INTERAGROMASH 2021» I. DOI: 10.1007/978-3-030-80946-1\_82*

15. Buryanov A.F. Formation of the spatial structure of a condensed system of calcium sulphatedihydrate/ Buryanov A.F., Petropavlovskii K.S., Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B.// Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference on Modelling and Methods of Structural Analysis 2019, MMSA 2019. 2020. P. 012194.

16. Petropavlovskii K.S. Structure formation of self-reinforced gypsum/ Petropavlovskii K.S., Novichenkova T.B., Petropavlovskaya V.B.// MENDELEEV 2021. Book of abstracts XII International Conference on Chemistry for Young Scientists. Saint Petersburg, 2021. P. 462.

17. Petropavlovskaya V.B. Gypsum composites with glass granules/ Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Buryanov A.F., Petropavlovskii K.S. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Сер. «International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering, MPCPE 2020» 2020. P. 012079.

18. Петропавловская В.Б. Утилизация отходов минерального волокна в производстве гипсовых изделий / В.Б. Петропавловская, Т.Б. Новиченкова, А.Ф. Бурьянов, В.Н. Соловьев, К.С. Петропавловский // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 12 (111). С. 1392-1398.

19. Ратинов В.Б. Добавки в бетон / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг // М.: Стройиздат, 1989. 188 с.

## **References**

1. Chernysheva N.V. Waterproof gypsum composite materials with the use of technogenic raw materials / N. V. Chernysheva, V. S. Lesovik, M. Yu. Drebezgova // - Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2015. 320 p. ISBN 978-5-361-00296-2.

2. Zolotukhin S.N. Ecological problems of the construction industry and ways to solve them / S.N. Zolotukhin, O.B. Kukina, V.V. Volkov, A.N. Tsyplakov // Improving the efficiency of production and use of gypsum materials and products. Col-

lection of materials of the X International Scientific and Practical Conference. 2021, P. 49-68.

3. Alfimova N.I. Overview analysis of methods for obtaining binders from gypsum-containing industrial waste / N.I. Alfimova, S.Yu. Pirieva, M.Yu. Elistratkin, N.I. Kozhukhova, A.A. Titenko // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2020. № 11. P. 8-23.

4. Komarov M.A. Synthesis of calcium sulfate dihydrate from technogenic raw materials / M.A. Komarov, N.G. Korob, V.I. Romanovsky // Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied sciences. 2020. № 16. P.76-82.

5. Fomenko A.I. Properties of phosphogypsum as a technogenic raw material resource for the production of dry building mixes / A.I. Fomenko // In the collection: Priority areas of research in the natural and technical sciences in the XXI century. Collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference. Under the general editorship of E.P. Tkacheva. 2018. P. 234-237.

6. Beznogova O.Yu. Modification of the binder composition for 3D printing / O.Yu. Beznogova, O.V. Azovtseva, E.N. Potapova // Advances in chemistry and chemical technology. 2021. T. 35. № 14(249). P.10-12.

7. Lesovik V. Optimization of fresh properties and durability of the green gypsum-cement paste / Lesovik V., Chernysheva N., Fediuk R., Amran M., Murali G., de Azevedo A.R.G. // Construction and Building Materials. 2021. T. 287. P. 123035.

8. Chernysheva N.V. Composition and rheological properties of molding mixtures on composite gypsum binder / N. V. Chernysheva, V. S. Lesovik, M. Yu. Drebezhgova [and others] // Building materials. 2021. № 8. P. 45-52. DOI 10.31659/0585-430X-2021-794-8-45-52.

9. Chernysheva N.V. Composite gypsum binders for porous composites in construction printing technology / N.V. Chernysheva, S.V. Shatalova, S.V. Masalitina // University Science. 2021. № 1(11). P. 91-94.

10. Glagolev E.S. Compounding Features of Special Molding Mixes for 3D Printing Technology / E.S. Glagolev, N.V. Chernysheva, V.S. Lesovik, E.N. Le-

snichenko // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 147. P. 250-257. DOI 10.1007/978-3-030-68984-1\_37.

11. Drebezgova M.Y. Architectural design of residential modules using additive technologies / M.Y. Drebezgova, N.V. Chernysheva, V.A. Klimenko, A.V. Olishov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific Conference on Construction and Architecture: Theory and Practice for the Innovation Development 2019, CATPID 2019, Kislovodsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 033007. DOI 10.1088/1757-899X/698/3/033007.

12. Yakovlev G.I. Structure and properties of modified gypsum binder/ G.I. Yakovlev, A. Gordina, R. Drochytka, O. Smirnova, A.F. Buryanov // Smart and Sustainable Built Environment. 10(4):702-710. DOI: 10.1108/SASBE-04-2020-0037.

13. Petropavlovskaya V. Role of basalt dust in the formation of the modified gypsum structure/ V. Petropavlovskaya, M. Zavad'Ko, K. Petropavlovskii, A. Pustovgar, A. Buryanov, T. Novichenkova// Web of Conferences 97(1):02036 DOI: 10.1051/e3sconf/20199702036

14. Bessonov Yu. Gypsum Polymer Materials in Construction/ Yu. Bessonov, A. Zhukov, B. Efimov, I. Govryakov, E. Gorbunova // DOI: 10.1007/978-3-030-80946-1\_82 In book: XIV International Scientific Conference «INTERAGROMASH 2021» I. DOI: 10.1007/978-3-030-80946-1\_82.

15. Buryanov A.F. Formation of the spatial structure of a condensed system of calcium sulphatedihydrate / A.F. Buryanov, K.S. Petropavlovskii, V.B. Petropavlovskaya, T.B. Novichenkova // Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference on Modelling and Methods of Structural Analysis 2019, MMSA 2019. 2020. P. 012194.

16. Petropavlovskii K.S. Structure formation of self-reinforced gypsum/ K.S. Petropavlovskii, T.B. Novichenkova, V.B. Petropavlovskaya // MENDELEEV 2021. Book of abstracts XII International Conference on Chemistry for Young Scientists. Saint Petersburg, 2021. P. 462.

17. Petropavlovskaya V.B. Gypsum composites with glass granules/ V.B. Petropavlovskaya, T.B. Novichenkova, A.F. Buryanov, K.S. Petropavlovskii // IOP Con-

ference Series: Materials Science and Engineering. «International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering, MPCPE 2020» 2020. P. 012079.

18. Petropavlovskaya V.B. Utilization of mineral fiber waste in the production of gypsum products / V.B. Petropavlovskaya, T.B. Novichenkova, A.F. Buryanov, V.N. Solovyov, K.S. Petropavlovsky // Vestnik MGSU. 2017. Vol. 12. No. 12 (111). P. 1392-1398.

19. Ratinov V.B. Additives in concrete / V.B. Ratinov, T.I. Rosenberg // Moscow, 1989. 188 p.

---

**Петропавловская Виктория Борисовна** – д-р техн. наук, проф. кафедры производства строительных материалов, изделий и конструкций Тверского государственного технического университета

**Завадько Мария Юрьевна** – аспирант, ассистент кафедры автомобильных дорог, оснований и фундаментов Тверского государственного технического университета

**Новиченкова Татьяна Борисовна** – канд. техн. наук, доцент кафедры производства строительных материалов, изделий и конструкций Тверского государственного технического университета

**Петропавловский Кирилл Сергеевич** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. института Нано- и биотехнологий Тверского государственного технического университета

**Бурьянов Александр Федорович** – д-р техн. наук, проф. кафедры строительного материаловедения Московского государственного строительного университета

УДК 624.011.1:546.26.001.24

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И РАССЧЁТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕНТЫ  
ИЗ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА ДЛЯ ВНЕШНЕГО АРМИРОВАНИЯ  
ДЕРЕВЯННЫХ МОСТОВЫХ БРУСЬЕВ**

*Ф.Ф. Хошимова\*, А.Э. Поликутин, Д.В. Панфилов, Н.Г. Назаренко*

*Воронежский государственный технический университет,  
Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

*\*Адрес для переписки: Хошимова Феруза Фахридиновна,*

*E-mail: feruza-boymatova@mail.ru*

Развитие современных мостовых брусьев, обуславливается эволюцией опорных, усиливающих и армирующих конструкций с использованием новых усовершенствованных материалов. К таким материалам относятся полимерные композиты, которые увеличивают несущую способность, позволяют восстановить прочностные свойства и увеличивают срок службы с меньшими затратами и меньшей трудоёмкостью, благодаря простой структуре и малому весу. Физические свойства углеродного волокна (УВ) придают стойкость деревянному мостовому брусу (ДМБ) при статических воздействиях. Работа основана на теоретическом, экспериментальном и расчётном исследованиях ленты УВ для внешнего армирования ДМБ. Вопросам внешнего армирования деревянных конструкций посвящены работы [1-3], в которых подробно изложены принципы армирования деревянных конструкций, описана технология внешнего армирования лентой из углеводородного волокна (УВ) рассмотрены вопросы усиления изгибаемых конструкций лентой из УВ и проведены экспериментальные исследования изгибаемых конструкций. В научных исследованиях [4-6] приведены результаты сравнительного испытания армирования деревянных элементов лентой из УВ с постоянным и переменным воздействием на статический изгиб. А в работах [7-10] ходе испытаний получены результаты, свидетельствующие о незначительной потере прочности для деревянных балок с переменным армированием постоянным армированием полимерными композитами.

Достоверность научных положений и полученных результатов обеспечивается методическим обоснованием исследований, сравнений расчётных данных с использованием теорий строительной механики, а также анализом проведённых экспериментов, сходимости результатов опыта с полученными аналитическим путём данными на основе нормативных и технических характеристик. Опыты выполнены в Воронежском государственном техническом университете в лаборатории испытаний строительных конструкций центра коллективного пользования им. проф. Ю.М. Борисова с использованием проверенной универсальной 4-х колонной гидравлической испытательной системе INSTRON 1500 HDX для испытания на растяжение ленты из УВ.

*Ключевые слова:* *деревянный мостовой брус, лента из углеродного волокна, арматура, ПАН, полимерные композиты, прочность*

## **EXPERIMENTAL STUDY OF THE WORKABILITY OF WOODEN BRIDGES UNREINFORCED AND REINFORCED WITH CARBON FIBER TAPE UNDER STATIC LOADING**

*F.F. Khoshimova\*, A.E. Polikutin, D.V. Panfilov, N.G. Nazarenko*

*Voronezh State Technical University,  
Russian Federation, 394006, Voronezh, ul. 20-letia Oktabria, 84*

*\*Corresponding author: Hoshimova Feruza Fahridinivna,  
E-mail: feruza-boymatova@mail.ru*

The development of modern bridge beams is determined by the evolution of supporting, reinforcing and reinforcing structures using new and improved materials. Such materials include polymer composites, which increase the load-bearing capacity, restore the strength properties and increase the service life at a lower cost and less labor intensity due to the simple structure and low weight. The physical properties of carbon fiber (CF) give resistance to wooden bridge beam (WMB) under static impacts. The work is based on theoretical, experimental and computational studies of the UV tape for external reinforcement of DMB. Works [1-3] are devoted to the issues of external reinforcement of wooden structures, in which the principles of reinforcing wooden struc-

tures are described in detail, the technology of external reinforcement with hydrocarbon fiber (CF) tape is described, the issues of reinforcing bending structures with CF tape are considered, and experimental studies of bending structures are carried out. In scientific studies [4-6], the results of a comparative test of the reinforcement of wooden elements with a HC tape with a constant and variable effect on static bending are presented. And in the works [7-10], during the tests, results were obtained indicating an insignificant loss of strength for wooden beams with variable reinforcement and permanent reinforcement with polymer composites. The reliability of scientific provisions and the results obtained is ensured by the methodological justification of studies, comparisons of calculated data, using theories of structural mechanics, as well as the analysis of the experiments, the convergence of the results of the experiment with the data obtained analytically based on regulatory and technical characteristics. The experiments were carried out at the Voronezh State Technical University in the laboratory for testing building structures of the Center for Collective Use named after prof. Yu.M. Borisov using the proven universal 4-column hydraulic testing system INSTRON 1500 HDX for testing the tensile strength of the HDX tape.

***Keywords:** performance, bridge beam, carbon fiber, reinforcement, static load, normal stress, shear, measurement force sensor, strain measurement sensor, deflection meter*

**Введение.** Одним из путей совершенствования и повышения технико-экономической эффективности ДМБ является разработка конструктивных решений по обеспечению надежной работы деревянных балок на действие сдвигающих усилий при условии наиболее полного использования прочностных свойств древесины и арматуры. Применительно к изгибаемым элементам постоянной высоты сечения, одним из них является расположение арматуры растянутой зоны по траектории главных растягивающих деформаций.

Такое размещение арматуры в теле деревянного бруса можно считать рациональным, поскольку позволяет увеличить прочность и надежность конструкции на действие сдвигающих усилий с применением поперечного армирования, используя прочностные свойства продольной арматуры.

Теоретическая значимость работы заключается в дальнейшей разработке методов расчёта армированного лентой из углеродного волокна (УВ) ДМБ, при помощи которых можно оценить совместную работу основного элемента (мо-

стового деревянного бруса) с второстепенным (УВ), а также анализ зависимости соединений.

**Задача исследований стоит:**

1. Теоретическое исследование структуры и свойств ленты из УВ на основе ПАН. Подбор УВ.
2. Испытание ленты из УВ на растяжение, построение графика зависимости нагрузки от перемещения. Экспериментальное обоснование прочностных свойств УВ.
3. Определение предела прочности при растяжении ленты из УВ по ГОСТ Р 57407–2017 и сравнение его с расчетным и нормативным значением.
4. Определение модуля упругости УВ при растяжении по ГОСТ Р 57407–2017.
5. Сравнительный анализ полученных экспериментальных и расчётных данных.

**Теоретическое обоснование ленты из УВ**

В результате тщательного изучения видов и качеств УВ мы остановились на однонаправленной углеродной ленте Carbon Wrap Tape 230/150, так как оно имеется в наличии в нашем городе и обладает следующими свойствами (рис.1):



Рис. 1. Преимущества использования углеродного волокна

CarbonWrap лента УВ сделана на основе полиакрилонитрильных (ПАН) волокон, которое обладает высокомолекулярными свойствами. Преимущество ПАН заключается в огромном количестве выхода атомов углерода, которое в процессе окисления уменьшает и уплотняет волокна по длине на 13-20% и ста-

новится гигроскопичным, что придает ленте из УВ высоко прочностные свойства. Зациклизованные макромолекулы ПАН, расположенные параллельно и образуя кристаллическую решётку являются предматериалом для технологии изготовления УВ ленты. Предполагают, что структуру окисленного ПАН-волокна можно представить в следующем виде рис.2:

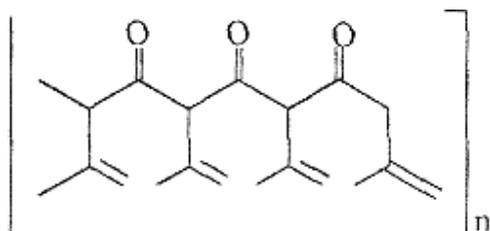


Рис. 2. Структура ПАН-волокна

Состав ленты из УВ изображено на рис.3:



Рис. 3. Состав углеродного волокна

Для решения поставленных задач проводились экспериментальные исследования на образцах, изготавливаемых по следующей технологии:

- заготовкой для экспериментального образца является цельный брус длиной 3250 мм для применения в ж/д мостах с расстоянием между осями пролетных строений 2200 мм и сечением 200×200 мм, изготовленный из сосны I-го сорта (принятый по ГОСТу 8486-86. Пиломатериалы хвойных пород. Технические условия). Образец показан на рис.4.

Качество заготовки соответствовало требованиям СП 64.13330.2017, в ней отсутствовали повреждения, трещины, пороки и т.д.



Рис. 4. Общий вид не армированного цельного бруса

- в качестве армирования бруса применена однонаправленная углеродная лента Carbon Wrap Tape 230/150 (рис.5)

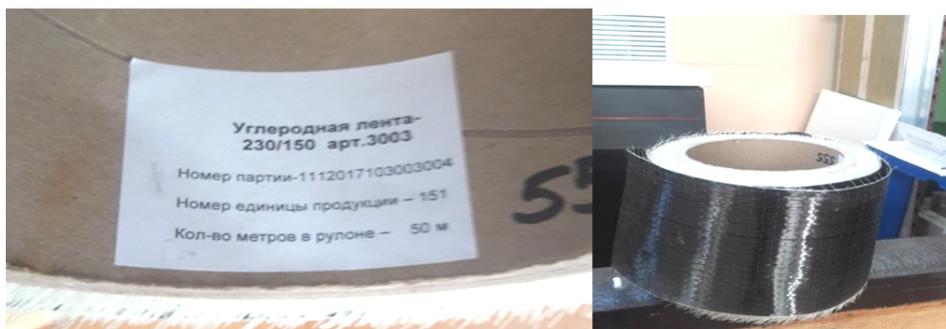


Рис. 5. Образец УВ ленты – CarbonWrapTape 230/150

УВ лента наклеивается на заранее подготовленный деревянный брус. Соединение производится путём поверхностного сцепления. В качестве адгезива

принято эпоксидное двухкомпонетное связующее ТУ 20.16.40-047-38276489-2017 Carbon Wrap® Resin 230+ (рис.6).



Рис. 6. Carbon Wrap Resin 230+

### **Экспериментальное обоснование и результаты испытания ленты из УВ**

Испытания заготовки из УВ ленты проводилось на образцах шириной 50 мм для обеспечения равномерного распределения его волокон на захват зажимом разрывной испытательной машины Instron 1500 NDX для статических испытаний на растяжение и при расстоянии между зажимами 250 мм, соответствующая методике поверки МП АПМ 02-19 для INSTRON, на котором проводились эксперименты. Методика испытания УВ лент принято по ГОСТ 1497-84 и ГОСТ 57407–2017 (рис.7 и 8).



Рис. 7. Образцы УВ ленты Carbon Wrap® Resin 230+ подготовленные для испытания



Рис. 8. Внешний вид оборудования в процессе проведения испытания УВ лент

Полученные данные соответствуют ГОСТ Р52544-06, СТО АСЧМ 7-93 и данные близкие по значению, что подтверждает достоверность испытаний. Также по результатам была построена диаграмма « $\sigma - \epsilon$ » (рис.9).

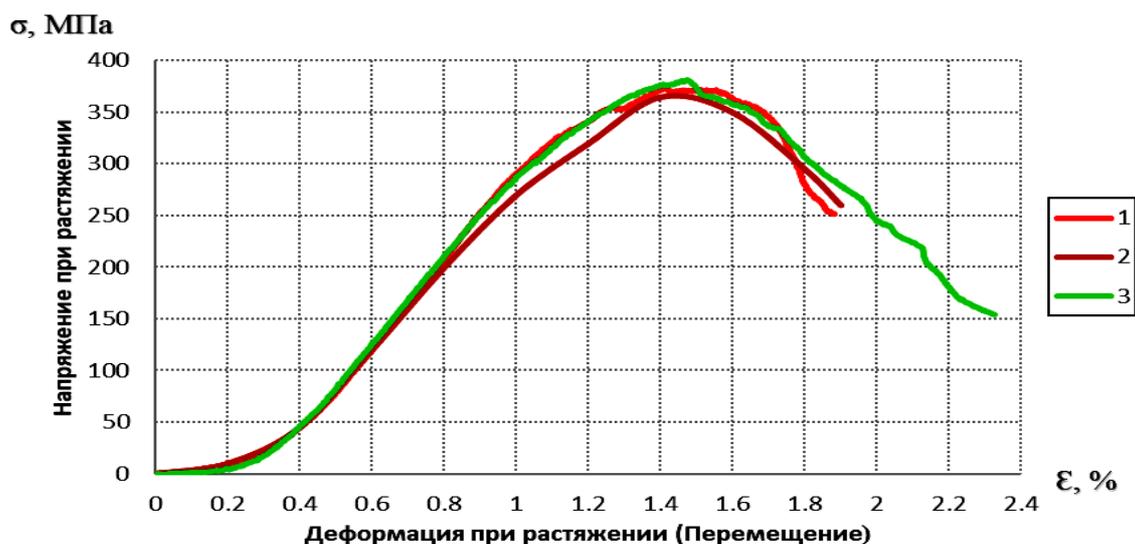


Рис. 9. График зависимости нагрузки от перемещения для УВ лент

Таблица 1

Результаты испытания УВ ленты на разрыв

№ образца ленты	Длина, мм	Ширина, мм	Толщина, мм	Площадь, мм <sup>2</sup>	Максимум нагрузки, кН	Напряжение при растяжении, МПа
1	250	50	0.02	10	3.73	373.1
2	250	50	0.02	10	3.67	367.3
3	250	50	0.02	10	3.81	381.1

Для создания армированного деревянного бруса на его поверхности наклеивали УВ ленты - на нижнюю грань единой лентой, а на остальные поверхности поперёк с шагом 50 мм (рис.10).



Рис. 10. Внешнее армирование цельного деревянного бруса УВ лентой

**Подводя итоги:** Впоследствии наблюдался незначительный разрыв в местах зажима ленты из УВ при растяжении на испытательной машине и значительное растяжение нитей волокон УВ при максимальном растяжении.

### Расчёт прочности и модуля упругости углеродного волокна при растяжении

Определение фактических размеров УВ

Таблица 2

Исходные данные арматуры и его характеристики	
УВ	Однонаправленная углеродная лента CarbonWrap Tape-230/150
Плотность УВ	230 г/м <sup>2</sup>
Ширина	150 мм
Вес	4.5 кг
Длина рулона	50 пог.м
Прочность на растяжение	Не менее 4900 МПа
Удлинение на разрыв волокна	1.8 %

Продолжение табл. 2

Тип нити	Углеродная нить
Основа	24К
Модуль упругости	$24.5 \cdot 10^4$
Плотность нитей основы, нитей на 10 см	$28 \pm 1$
Плотность нитей утка, нитей на 10 см	$10 \pm 1$
Прочность на растяжение волокна, МПа	3-4.9

Предел прочности углеродного волокна при растяжении рассчитывается по формуле 1:

$$\sigma = \frac{P_{\text{раз}}}{S} = \frac{3810}{1.217} = 3130,6 \quad , \quad (1)$$

где  $P_{\text{раз}}=3810$  (из таблицы 1) – разрушающая нагрузка, Н;  $S$  – суммарная площадь пучка моноволокон, которая рассчитывается по формуле 2:

$$S = \frac{W}{\rho} \times 1000 = \frac{28}{2.3} \times 1000 = 1.217 \text{ мм}^2, \quad (2)$$

где  $W=28$  (из таблицы 2 в соотв. ГОСТ 28006-88) – линейная плотность нити, г\1000 м;  $\rho=2.3$  – плотность УВ, г\см<sup>3</sup>.

Экспериментальный предел прочности равен:  $\sigma = \frac{F_{\text{max}}}{b \times h} = \frac{3810}{0.02 \times 50} = 3810$  МПа, что больше расчётного значения предела прочности.

Модуль упругости волокна при растяжении рассчитывается по формуле 3:

$$E = \frac{P_2 - P_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \times \frac{1}{S} \times \frac{1}{10} = \frac{380 - 240}{0.26\%} \times \frac{1}{12.17} \times 0.1 = 430 \text{ ГПа}, \quad (3)$$

где  $E$  – модуль упругости волокна, ГПа;  $P_2 - P_1$  – изменение нагрузки на этих участках, Н;  $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$  – удлинение, %.

Расчётный модуль упругости получился приблизительно равный модулю упругости, полученный нами экспериментальным путём ( $E_{\text{эксп.}} = 434$  ГПа).

**Заключение.** Армирование УВ лентой деревянного мостового бруса увеличивает его несущую способность в 1,47 раза. Благодаря своей уникальности и малому весу система внешнего армирования УВ лентой не создает дополнительную нагрузку ДМБ. Технология армирования с минимальным расходом и минимальным трудовыми затратами.

Армирование деревянного бруса лентой из углеродного волокна позволило обеспечить конструкцию более высокими прочностными характеристиками, а также позволяет компенсировать возможные пороки древесины, повреждения, трещины.

«Исследования, изложенные в данной работе, проводились с использованием оборудования ЦКП имени проф. Ю.М. Борисова ВГТУ, при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № 075-15-2021-662».

### **Список литературы**

1. Грибанов А.С. Восстановление деревянных конструкций импрегнированием полимерной композицией на примере промышленных зданий легкой и текстильной промышленности / Рощина С.И., Лукина А.В., Сергеев М.С., Власов А.В., Грибанов А.С. // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности No5(365) 2016, Иваново, 2016 г. С. 76-80.

2. Косов И.И. Применение древесины в качестве конструкционного материала в XXI веке. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniya-drevesiny-v-kachestve-konstruksionnogo-materiala-v-xxi-veke> (дата обращения: 10.04.2020).

3. Клюев С.В. Усиление и восстановление конструкций с использованием композитов на основе углеволокна // Бетон и железобетон. 2012. № 3. С. 23-26.

4. Крицин А.В., Тихонов А.В., Лобов Д.М. Исследование деревянных элементов, усиленных углеродным волокном, при статическом изгибе // Приволжский научный журнал. №4(24). Н. Новгород, ННГАСУ, 2012. С. 55-60.

5. Крицин А.В., Лихачева С.Ю., Лобов Д.М., Тихонов А.В. Экспериментальные исследования деревянных балок, усиленных углеродной лентой // Приволжский научный журнал. №3(35). Н. Новгород, ННГАСУ, 2015. С. 103-109.

6. Крицин А.В., Лихачева С.Ю., Лобов Д.М., Тихонов А.В. Анализ методов расчета деревянных изгибаемых элементов усиленных углеродным волокном // Региональная архитектура и строительство. № 4(21). Пенза, ПГУАС, 2014. С. 97-104.

7. Платонов А.П. Полимерные материалы в дорожном и аэродромном строительстве. М.: Транспорт, 1994. 156с. ISBN 5-277-01645-7 : 3800-00.

8. Заикин А.Е. Полимерные композиционные материалы: учебное пособие / А. Е. Заикин. Полимерные композиционные материалы; Весь срок охраны авторского права. Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2018. 292 с. Текст. Весь срок охраны авторского права. ISBN 978-5-7882-2429-9. URL: <http://www.iprbookshop.ru/95010.html>.

9. Corradi M. Bond Strength of Composite CFRP Reinforcing Bars in Timber / M. Corradi, L. Righetti, A. Borri // URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5455648> (дата обращения 27.09.2017).

10. Gintoff V. CLT and the future of wood: The timber revolution comes to industrial architecture / V. Gintoff URL: <https://www.archdaily.com/782264/clt-crosslaminated-timber-and-the-future-of-wood-the-timber-revolution-comes-to-industrialarchitecture> (дата обращения 15.08.2017).

### **References**

1. Griбанov A.S. Restoration of wooden structures by impregnation with a polymer composition on the example of industrial buildings of the light and textile industries / Roshchina S.I., Lukina A.V., Sergeev M.S., Vlasov A.V., Griбанov A.S. // News of higher educational institutions. Technology of the textile industry No5 (365) 2016, Ivanovo, 2016. P. 76-80.

2. Kosov I Application of wood as a structural material in the XXI century. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniya-drevesiny-v-kachestve-konstruktsionnogo-materiala-v-xxi-veke> (Date of access: 04/10/2020).
3. Klyuev S.V. Strengthening and restoration of structures using composites based on carbon fiber // Concrete and reinforced concrete. 2012. No. 3. P. 23-26.
4. Kritsin A.V., Tikhonov A.V., Lobov D.M. Study of wooden elements reinforced with carbon fiber during static bending // Privolzhsky scientific journal. No. 4(24). N. Novgorod, NNGASU, 2012. P. 55-60.
5. Kritsin A.V., Likhacheva S.Yu., Lobov D.M., Tikhonov A.V. Experimental studies of wooden beams reinforced with carbon tape // Privolzhsky scientific journal. No. 3(35). N. Novgorod, NNGASU, 2015. P. 103-109.
6. Kritsin A.V., Likhacheva S.Yu., Lobov D.M., Tikhonov A.V. Analysis of calculation methods for wooden bending elements reinforced with carbon fiber // Regional architecture and construction. No. 4(21). Penza, PGUAS, 2014, P. 97-104.
7. Platonov, Anatoly Pavlovich. Polymeric materials in road and airfield construction. M.: Transport, 1994. 156p. ISBN 5-277-01645-7: 3800-00.
8. Zaikin A.E. Polymer composite materials: textbook / A. E. Zaikin. Polymer composite materials; The entire term of copyright protection. Kazan: Kazan National Research Technological University, 2018. 292 p. Text. The entire term of copyright protection. ISBN 978-5-7882-2429-9. URL: <http://www.iprbookshop.ru/95010.html>.
9. Corradi M. Bond Strength of Composite CFRP Reinforcing Bars in Timber / M. Corradi, L. Righetti, A. Borri // URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5455648> (accessed 27.09.2017).
10. Gintoff V. CLT and the future of wood: The timber revolution comes to industrial architecture / V. Gintoff URL: <https://www.archdaily.com/782264/clt-crosslaminated-timber-and-the-future-of-wood-the-timber-revolution-comes-to-industrial-architecture> (Accessed 08/15/2017).

**Хошимова Феруза Фахридиновна** – аспирант кафедры строительных конструкций, оснований и фундаментов Воронежского государственного технического университета

**Поликутин Алексей Эдуардович** – канд. техн. наук, доцент кафедры строительных конструкций, оснований и фундаментов Воронежского государственного технического университета

**Панфилов Дмитрий Вячеславович** – заведующий кафедрой, декан факультета, канд. техн. наук, доцент кафедры строительных конструкций, оснований и фундаментов Воронежского государственного технического университета

**Назаренко Николай Григорьевич** – старший преподаватель кафедры строительных конструкций, оснований и фундаментов Воронежского государственного технического университета

УДК 543.544

**АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ МЕТОДОВ ГАЗОВОЙ  
ХРОМАТОГРАФИИ И КАПИЛЛЯРНОГО ЭЛЕКТРОФЕРЕЗА**

*Н.В. Шелехова<sup>1\*</sup>, О.Б. Рудаков<sup>2</sup>, К.К. Полянский<sup>3</sup>, Я.О. Рудаков<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии -  
филиал ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания,*

*биотехнологии и безопасности пищи»,*

*Российская Федерация, 111033, г. Москва, ул. Самокатная, 4б*

<sup>2</sup>*Воронежский государственный технический университет,*

*Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

<sup>3</sup>*Воронежский филиал Российского экономического университета  
имени Г.В. Плеханова,*

*Российская Федерация, 394036, Воронеж, ул. Карла Маркса, 67а*

*\*Адрес для переписки: Шелехова Наталия Викторовна,*

*E-mail: 4953610101@mail.ru*

В статье, на основании анализа современных тенденций аналитического приборостроения, систематизированы актуальные тренды развития аппаратурного оформления методов газовой хроматографии и капиллярного электрофореза, широко применяемых для установления качественного и количественного состава сложных многокомпонентных смесей. Показано, что приборы для газовой хроматографии, капиллярного электрофореза и вспомогательное оборудование постоянно совершенствуется: создаются новые универсальные и селективные детекторы для высокоточного обнаружения различных аналитов, хроматографические колонки для эффективного разделения определенных классов химических соединений, устройства для высокоточного воспроизводимого ввода пробы, что обеспечивает высокую точность и достоверность инструментального анализа; разрабатывается новое вспомогатель-

ное давление, глубокую очистку газов и низкое содержание влаги. Для получения особо чистой воды в лабораторных условиях в целях реализации метода капиллярного электрофореза разработаны приборы, которые позволяют получать воду с удельным сопротивлением 18 МОМ. Актуальной задачей является разработка новых методик анализа, базирующихся на использовании возможностей современного аналитического оборудования. Внедрение в лабораторную практику современного инструментального оборудования и инновационных методик позволит существенно расширить круг определяемых аналитов и снизить предел их обнаружения.

*Ключевые слова:* газовая хроматография, капиллярный электрофорез, вспомогательное оборудование, химический состав, контроль, инструментальные методы анализа

## **HARDWARE DESIGN OF GAS CHROMATOGRAPHY AND CAPILLARY ELECTROPHORESIS METHODS**

*N.V. Shelekhova<sup>1\*</sup>, O.B. Rudakov<sup>2</sup>, K.K. Polyansky<sup>3</sup>, Ya.O. Rudakov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*The All-Russian Research Institute of Food Biotechnology is a branch of the Federal State Budgetary Institution «Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety»*

*Russian Federation, 111033, Moscow, Samokatnaya str., 4b*

<sup>2</sup>*Voronezh State Technical University,*

*Russian Federation, 394006, Voronezh, ul. 20-letiya Oktyabrya, 84*

<sup>3</sup>*Voronezh Branch of the Plekhanov Russian University of Economics,*

*Russian Federation, 394036, Voronezh, Karl Marx str., 67a*

*\*Corresponding author: N.V. Shelekhova, E-mail: 4953610101@mail.ru*

The article presents the results of the analysis of modern analytical instruments, systematized. It is shown that devices for gas chromatography, capillary electrophoresis and auxiliary equipment are constantly being improved. New universal and selective detectors are being created for high-precision detection of various analytes, chromatographic columns for detection of detection

of certain classes of contamination, devices for high-precision reproducible sampling, which allows detection of accuracy and detection of instrumental analysis. New auxiliary equipment is being developed - nitrogen, air and air generators, providing high output pressure, deep gas purification and low moisture content. The generated gas generators can be used as a gas supplier. To obtain special laboratory conditions for the use of drop electrophoresis, devices are used that make it possible to obtain water with a high resistance of 18 mΩ. An urgent task is to develop new methods of analysis based on a collection of new capabilities of analytical equipment. In this area of research, the leading role belongs to research institutes and public institutions of higher education. The introduction of instrumental equipment in modern laboratory practice and the emergence of the likelihood of a significant increase in the range of observed analytes and a decrease in the limit of their threats.

*Keywords: gas chromatography, capillary electrophoresis, auxiliary equipment, chemical composition, control, instrumental methods of analysis*

**Введение** Современные тренды четвертой индустриальной революции Индустрия 4.0. нацелены на глобальную интеграцию цифровых технологий во все технологические и управленческие процессы производства и становятся главным приоритетом развития промышленности. Нельзя не отметить, что внедрение цифровых технологий в промышленность приведет к кардинальным трансформациям модернизируемых производств и переносу акцентов на применение нового инструментария для решения поставленных задач. Вполне очевидно, что внедрение инновационных решений, основанных на принципах искусственного интеллекта, кластерного анализа, интернета вещей, облачных вычислений, будет способствовать более рациональному использованию ресурсов и повышению эффективности аналитического контроля производств.

Исследования в области информационных технологий охватывают обширный перечень научных направлений. Приборостроение одна из наиболее значимых отраслей, вносящая огромный вклад в развитие научно-технического прогресса в области аналитической химии. В современных условиях бурное развитие механики, робототехники, механотроники, а также методов искусственного интеллекта, способствует интенсификации приборостроения. Значи-

мость научных разработок в обозначенном векторе подтверждена многочисленными трудами исследователей [1, 2].

Решение проблемы контроля качества технологических процессов производства требует оснащения испытательных лабораторий современным аналитическим оборудованием и применения высокоэффективных методик контроля. Следует отметить, что основные тенденции в аналитическом приборостроении направлены на модернизацию и усовершенствование измерительного оборудования, к которому относятся газовые хроматографы и системы капиллярного электрофореза [3].

### **Основная часть**

**Газовая хроматография.** В 1903 году опубликован доклад Михаила Семеновича Цвета «О новой категории адсорбционных явлений и их применении к биохимическому анализу», в котором была впервые высказана идея хроматографического метода [4].

Газовая хроматография – физико-химический метод исследования, получивший широкое распространение в аналитической практике, и применяется в различных областях промышленности. К достоинствам газовой хроматографии можно отнести относительно низкую стоимость анализа, высокую точность, универсальность, возможность определения индивидуальных аналитов в сложных многокомпонентных смесях [5-8].

Широкое распространение газовой хроматографии неразрывно связано с новыми достижениями в области приборостроения [9, 10]. В целях реализации хроматографического метода широко применяется такое аналитическое оборудование, как промышленные, лабораторные, портативные газовые хроматографы, хроматографические микросистемы и др.

Портативные газовые хроматографы направлены на решение определенного круга задач. Отличительной чертой подобного оборудования является компактность, что имеет важное значение при ограниченном пространстве. В качестве примера портативного хроматографа можно привести хроматографы

490 Micro GC (Agilent, США), Газохром 2000 (Хроматэк, Россия), ЭХО-EW (Сибертех, Россия).

Промышленные (поточные) газовые хроматографы, предназначены для работы в непрерывном режиме без участия оператора. Эти приборы изготавливаются для решения определенного круга задач и встраиваются в технологическую цепь производства. Поточная хроматография является надежным методом, обеспечивающим непрерывный анализ состава сложных многокомпонентных объектов. Таким образом, непрерывный контроль технологических процессов, основанный на комплексном применении цифровых технологий и современного аналитического оборудования, позволяет в режиме реального времени контролировать технологический процесс. Поточные хроматографы предназначены для промышленного анализа газов и жидкостей. Непрерывная и корректная работа промышленного хроматографа обеспечивается комплексом устройств: пробоотборники, системы пробоподготовки, аналитический хроматограф, система управления и регистрации. В качестве примера можно привести поточный хроматограф Кристалл 7000 (Хроматэк, Россия), Петрохром 4000 (Мета-хром, Россия) и др.

Лабораторные газовые хроматографы выпускаются в серийном производстве и предназначены для решения широкого круга аналитических задач: их применяют в медицине, криминалистике, нефтехимии. На отечественном рынке аналитического оборудования представлена продукция производства Agilent Technologies, США) модели 8860, 8890, Shimadzu GC-2014 (Shimadzu, Япония), Thermo Scientific 1300 (Thermo, США), МАЭСТРО-2 (Интерлаб, Россия), газовые хроматографы Кристалл модели 2000, 5000 (Хроматэк, Россия) и других производителей.

Базовыми элементами типового хроматографа являются: узел ввода пробы, блок регулировки потоков газов, термостат, детектор. Важно подчеркнуть, что для решения конкретной аналитической задачи хроматограф оснащают определенным типом детектора и хроматографической колонкой.

Для газовой хроматографии разработано более 50 типов детекторов, однако, широкое применение нашли лишь некоторые из них [11]. Среди этих детекторов есть как универсальные, так и селективные. В аналитической практике наиболее широкое распространение получили: пламенно-ионизационный детектор (ПИД), детектор по теплопроводности (ДТП), электронно-захватный детектор (ЭЗД), азотно-фосфорный детектор (АФД), масс-селективный детектор (МСД).

Детекторы ПИД и МСД используют для анализа органических соединений, пищевой продукции, спиртных напитков, природных материалов, образцов нефти и нефтепродуктов, наркотиков, токсикантов [12]. Детектор ДТП применяют для общего органического и неорганического анализа, контроля атмосферного воздуха, детектор ЭЗД используется в экологическом контроле для определения содержания галогенорганических соединений и пестицидов, детектор АФД для анализа азот- и фосфорсодержащих соединений [13-15].

Развитие метода газовой хроматографии неразрывно связано с совершенствованием хроматографических колонок. Следует отметить, что аналитические возможности газового хроматографа определяются разделяющей способностью хроматографических колонок, в которых происходит хроматографическое разделение анализируемых смесей. Различают капиллярные и насадочные колонки. Наиболее широкое распространение получили капиллярные колонки, которые различаются по диаметру, длине, типу неподвижной фазы, нанесенной на внутреннюю стенку капилляра: от неполярных покрытий из диметилполисилоксана до полярных из полиэтиленгликоля. Следует отметить, что выбор хроматографической колонки, также как и выбор типа детектора, обусловлен параметрами решаемой аналитической задачи [16].

Впервые серийный выпуск капиллярных кварцевых колонок осуществила фирма Hewlett-Packard в 1976 г. В настоящее время широкий спектр хроматографических колонок для решения обширного круга аналитических задач выпускают такие производители как Agilent, Phenomenex, Restek, Supelco и др.

Метод газовой хроматографии может быть реализован с использованием газов: воздуха, водорода, аргона, азота и гелия. Газы, применяемые в газовой хроматографии, не должны содержать примесей, которые могут влиять на результаты анализа или привести к сокращению срока службы хроматографической колонки. Требования в квалификации чистоты газов зависят от выполняемой функции газа и типа детектора.

Выбор газа-носителя зависит от прикладной задачи. Важно отметить, что газ-носитель должен быть инертен по отношению к компонентам исследуемой смеси веществ. Для насадочных колонок чаще используют аргон, гелий, азот, а для капиллярных азот, водород, гелий. Известно, что водород и гелий наиболее предпочтительны в качестве газа-носителя для капиллярных колонок, однако на практике из-за значительной стоимости гелия и высокой взрывоопасности водорода чаще всего выбирают азот.

Обоснованный выбор оптимального источника газов для питания газовых хроматографов обеспечивает надежность хроматографической системы и точность получаемых результатов анализа. Еще несколько лет назад в качестве источника газа были актуальны баллоны. Однако, использование газовых баллонов вызывало трудности по обеспечению их безопасной эксплуатации, что и стало предпосылкой для развития важного направления приборостроения – разработки генераторов чистых газов для хроматографии. Результаты научно-исследовательских разработок в данном направлении реализованы в различных моделях генераторов чистых газов производства российских (Химэлектроника, Метакром) и зарубежных (Parker) производителей.

Генераторы азота, водорода и воздуха – предназначены для получения в лабораторных условиях газов высокой чистоты для питания газовых хроматографов. Встроенные регуляторы обеспечивают стабильное выходное давление газов, интегрированные системы каталитической очистки позволяют снизить концентрацию углеводородов до минимальных значений, небольшие габариты и низкий уровень шума дают возможность размещать генераторы непосредственно в помещениях лаборатории. Таким образом, благодаря высокому вы-

ходному давлению, глубокой очистке и низкому содержанию влаги вырабатываемые генераторами газы могут быть использованы в качестве газа-носителя. Применение генераторов газов в аналитической практике позволяет значительно повысить чувствительность хроматографической системы и точность результатов анализов.

**Капиллярный электрофорез.** В 1809 г. Фердинанд Фридрих Фон Рейсс открыл явление электрофореза и электроосмоса, что послужило предпосылкой для множества научных и практических применений электрофореза и осмоса в различных областях науки и практики [17]. Метод капиллярного электрофореза, основан на разделении компонентов сложных смесей в кварцевом капилляре под действием приложенного постоянного электрического поля [18-21]. Известен ряд вариантов капиллярного электрофореза: капиллярный зонный электрофорез (КЗЭ), мицелярная электрокинетическая хроматография (МКЭКХ) и др.

Системы капиллярного электрофореза на российском рынке представлены продукцией различных производителей: Agilent 7100 (Agilent Technologies, США), Капель 104,105,205 (Люмэкс, Россия), Prin CENext 800, 870, 875 (PrinceTechnologies, Нидерланды) и др. В состав базовой системы капиллярного электрофореза входит прибор, основными узлами которого являются: устройство ввода пробы, кварцевый капилляр, источник высокого напряжения и детектор.

Системы капиллярного электрофореза могут быть оснащены фотометрическим детектором, применяемым для анализа белков, ионов металлов, органических соединений), флуоресцентным детектором (ФМД), лазерным флуоресцентным детектором (аминокислоты, фрагменты ДНК), кондуктометрическим детектором (КМД) для определения ионов металлов, аминов, карбоновых кислот, амперометрическим, потенциометрическим и масс-селективным детектором (МСД) [22, 23].

Деионизованная вода характеризуется глубокой степенью обессоливания и имеет широкий спектр применения в аналитической лабораторной практике,

в том числе и для приготовления буферных и стандартных для реализации метода капиллярного электрофореза [24]. Для получения особо чистой воды в лабораторных условиях разработаны прибор Водолей-М (Химэлектроника, Россия) и установка WaterPro PS/General Chemistry (Labconco, США), которые позволяют получать воду, удельное сопротивление которой составляет 18 МОМ.

Важно подчеркнуть, что в аналитической практике огромную роль играет разработка новых и совершенствование известных методов анализа, их теоретическое обоснование [25, 26]. В свете вышеизложенного нельзя не отметить значительные достижения в области развития методологии установления химического состава хроматографическими и электрофоретическими способами. Развиваются настоящие российские хроматографические школы в городах: Белгород, Воронеж, Дзержинск, Кемерово, Краснодар, Москва, Новосибирск, Самара, Саратов, Санкт-Петербург. Весомый вклад в развитие инструментальных методов анализа внесли российские учёные: Березкин В.Г., Буряк А.К., Бутырская Е.В., Буланова А.В., Витенберг А.Г., Горшков В.И., Григорьев А.М., Даванков В.А., Дейнека В.И., Долгоносков А.М., Иванов В.А., Калмановский В.И., Калинин А.И., Красиков В.Д., Карцева Л.А., Котов В.В., Ланин С.Н., Ларионов О.Г., Лебедев А.Т., Москвин Л.Н., Онучак Л.А., Ревельский И.А., Рябчиков Д.И., Руденко Б.А., Рудакова Л.В., Рудаков О.Б., Зенкевич И.Г., Золотов Ю.А., Сакодынский К.И., Савчук С.А., Селеменев В.Ф., Сидельников В.Н., Сычев С.Н., Темердашев З.А., Хамизов Р.Х., Штыков С.Н., Шелехова Т.М., Шелехова Н. В., Шапошник В.А., Шпигун О.А., Яшин Я.И. и другие исследователи [27].

Важно подчеркнуть, что отечественная хроматография продолжает успешно развиваться и научные школы готовят новые поколения хроматографистов. Создание новых методик качественного и количественного состава химических соединений и их смесей является важной аналитической задачей, решение которой позволяет получать новые знания о химическом составе веществ.

**Заключение.** Таким образом, современные разработки в области совершенствования аналитического оборудования и методик инструментального

анализа позволяют существенно расширить круг определяемых веществ, снизить предел их обнаружения, повысить селективность определения. Оснащение лабораторий современным аналитическим оборудованием и внедрение инновационных методик позволяет на новом уровне реализовывать методы газовой хроматографии и капиллярного электрофореза.

*Работа выполнена в рамках исследований на базе Коллективного исследовательского центра им. проф. Ю.М. Борисова Воронежского государственного технического университета, который частично поддерживается Министерством науки и образования Российской Федерации, Проект № 2021-2296-512-0001-060.*

### **Список литературы**

1. Золотов Ю.А. Звезды аналитического приборостроения. Масао Хориба//Аналитика. 2020. Т.10. №2. С. 172-176.
2. Золотов Ю.А. Звезды аналитического приборостроения. Эрдхард Меттлер//Аналитика. 2020. Т.10. №5. С.424-426.
3. Шелехова Н.В., Шелехова Т.М., Скворцова Л.И. [и др.] Методы газовой хроматографии, капиллярного электрофореза, хромато-масс-спектрометрии и информационные технологии в аналитическом контроле спиртных напитков // Пищевая промышленность 2021. № 9. С. 63-64. DOI: 10.52653/PPI. 2021.9.9. 028.
4. Цвет М.С. О новой категории адсорбционных явлений и о приложении их к биохимическому анализу//Труды Варшавского Общества естествоиспытателей, отделение биологии.1903. Т.14. С. 20-29.
5. Шапошник В.А. 110 лет открытия хроматографии М.С. Цветом// Сорбционные и хроматографические процессы. 2013. Т.6. С. 741-750.
6. Яшин Я.И., Яшин А.Я. Основные тенденции развития хроматографии после 110- летия со дня ее открытия М.С. Цветом // Сорбционные и хроматографические процессы. 2014. Т.14. № 2. С. 203-213.

7. Рудаков О.Б., Хорохордина Е.А., Грошев Е.Н. [и др.] Хроматография в контроле качества и безопасности строительных материалов // Аналитика и контроль. 2016. №4. С. 254-265.

8. Якуба Ю.Ф., Темердашев З.А. Хроматографические методы в анализе и идентификации виноградных вин// Аналитика и контроль. 2015. Т. 19. № 4. С. 288-301.

9. Золотов Ю.А. Звезды аналитического приборостроения. Роберт Фенниган//Аналитика. 2020. Т.10. №3. С. 252-256.

10. Золотов Ю.А. Звезды аналитического приборостроения. Рассел и Сигурд Варианы//Аналитика. 2020. Т.10. №4. С. 340-341.

11. Логутов В.И. Детекторы для газовых хроматографов. Выбор детектора, подготовка к работе и оценка состояния хроматографа по основным характеристикам детектора. Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. 2017. 52 с.

12. Заикин В.Г., Борисов Р.С. Обзор. Масс-спектрометрия как важнейшая аналитическая основа ряда омиксных наук //Масс-спектрометрия. 2021. Т. 18. № 1. С. 4-31.

13. Лебедев А.Т. Масс-спектрометрия для анализа объектов окружающей среды. Москва. Техносфера. 2013. 632с.

14. Пыцкий И.С., Кузнецова Е.С., Буряк А.К. Масс-спектрометрия как современный метод анализа полимеров // Сорбционные и хроматографические процессы.2021. Т.21. №1. С. 69-76.

15. Темердашев А.З., Афонин А.С., Корпакова И.Г. Хромато-масс-спектрометрическая идентификация компонентного состава выбросов углеводородов при перегрузке товарных нефтепродуктов // Аналитика и контроль. 2018. Т.22. №1. С. 35-43.

16. Spectrometric identification of organic compounds / R.M. Silverstein, T. Morrill, C. Bassler- John Wiley & Sons. 1991. 475 p. ISBN 0-47154-193-1.

17. Zaitseva-Baum E.A. Ferdinand Friedrich v. Reuss und die Mineralwässeruntersuchungen - In: Deutsch-russische Beziehungen in Medizin und Naturwissenschaften // Hgg. D.V. Engelhardt u. I.Kästner. Bd. 12. Aachen: Shaker Verlag. 2005. P. 137-150.
18. Rizzi, A. Fundamental aspects of chiral separations by capillary electrophoresis/ A. Rizzi // Electrophoresis.2001 .V.22. P.3079-3106.
19. Handbook of Capillary Electrophoresis/2-nd Ed. J.P.Landers. - Boca Raton, FL:CRC Press, 1997. 912p.
20. Шелехова Н.В., Шелехова Т.М., Скворцова Л.И. [и др.] Расширение аналитических возможностей капиллярного электрофореза для исследования спиртных напитков// Пищевая промышленность.2019. №11. С. 68-71. DOI: 10.24411 / 0235 2486 2019 10181.
21. Шелехова Н.В., Поляков В.А., Римарева Л.В. Капиллярный электрофорез - высокоэффективный аналитический метод исследования состава сложных биологических сред //Пиво и напитки. 2017. №2. С. 34-38.
22. Комарова Н. В., Каменцев Я. С. Практическое руководство по использованию систем капиллярного электрофореза «КАПЕЛЬ». СПб.: ООО «Веда». 2006. 212 с.
23. Capillary Electrophoresis: Theory and Practice/ Eds. Grossman P.D. and Colburn J.C. -SanDiego. USA: Academic Press. 1992. 352 p.
24. Золотов Ю.А. Звезды аналитического приборостроения. Джеймс Уотерс//Аналитика. 2020. Т.10. №6. С. 498-501.
25. Золотов Ю.А. Эволюция методов химического анализа//Вестник Российской академии наук. 2020. Т.90. №2. С. 140-147.
26. Золотов Ю.А. Методологические аспекты аналитической химии // Журнал аналитической химии. 2021. Т. 76. №1. С. 5-19.
27. Рудаков О.Б., Селеменев В.Ф. Российская хроматография – времена и люди //Сорбционные и хроматографические процессы. 2014. Т. 14. №3. С. 384-395.

## References

1. Zolotov Yu.A. Zvezdy analiticheskogo priborostroeniya. Masao Horiba [Stars of analytical instrumentation. Masao Horiba]. Analitika [Analytics]. 2020; 2: 172-176. (In Russ.).
2. Zolotov Yu.A. Zvezdy analiticheskogo priborostroeniya. Erdhard Mettler [Stars of analytical instrumentation. Erdhard Mettler]. Analitika [Analytics]. 2020; 5: 424-426. (In Russ.).
3. Shelekhova N.V., Shelekhova T.M., Skvortsova L.I. [et al.] Metody gazovoj hromatografii, kapillyarnogo elektroforeza, hromato-mass-spektrometrii i informacionnye tekhnologii v analiticheskom kontrole spirtnyh napitkov [Methods of gas chromatography, capillary electrophoresis, chromato-mass spectrometry and information technologies in the analytical control of alcoholic beverages] Pishchevaya promyshlennost' [Food industry]. 2021; 9. S. 63-64. (In Russ.). DOI: 10.52653 / PPI. 2021. 9.9.028.
4. Tsvet M.S. O novej kategorii adsorbcionnyh yavlenij i o prilozhenii ih k biokhimicheskomu analizu [On a new category of adsorption phenomena and their application to biochemical analysis] Trudy Varshavskogo Obshestva estestvoispytatelej, otdelenie biologii [Proceedings of the Warsaw Society of Naturalists, Department of Biology]. 1903; 14:20-29.
5. Shaposhnik V.A. 110 let otkrytiya hromatografii M.S. Cvetom [110 years of the discovery of chromatography by M.S. Tsvet] Sorbcionnye i hromatograficheskie processy [Sorption and chromatographic processes]. 2013; 6: 741-750. (In Russ.).
6. Yashin Ya.I, Yashin A.Ya. Osnovnye tendencii razvitiya hromatografii posle 110- letiya so dnya ee otkrytiya M.S. Cvetom [The main trends in the development of chromatography after the 110th anniversary of its discovery by M.S. Tsvet] Sorbcionnye i hromatograficheskie processy [Sorption and chromatographic processes]. 2014; 2:203-213. (In Russ.).
7. Rudakov O.B., Khorokhordina E.A., Groshev E.N. [et al.] Hromatografiya v kontrole kachestva i bezopasnosti stroitel'nyh materialov [Chromatography in quality

control and safety of building materials] *Analitika i kontrol'* [Analytics and control]. 2016; 4:254-265. (In Russ.).

8. Yakuba Yu.F., Temerdashev Z.A. Hromatograficheskie metody v analize i identifikacii vinogradnyh vin [Chromatographic methods in the analysis and identification of grape wines] *Analitika i kontrol'* [Analytics and control]. 2015; 4: 288-301.

9. Zolotov Yu.A. Zvezdy analiticheskogo priborostroeniya. Robert Fennigan [Stars of analytical instrumentation. Robert Fennigan]. *Analitika* [Analytics]. 2020; 2:252-256. (In Russ.).

10. Zolotov Yu.A. Zvezdy analiticheskogo priborostroeniya. Rassel i Sigurd Variany [Stars of analytical instrumentation. Rassel and Sigurd Varian]. *Analitika* [Analytics]. 2020;4:340-341. (In Russ.).

11. Logutov V.I. Detektory dlya gazovyh hromatografov. Vybor detektora, podgotovka k rabote i ocenka sostoyaniya hromatografa po osnovnym harakteristikam detektora [Detectors for gas chromatographs. Selection of the detector, preparation for operation and assessment of the state of the chromatograph according to the main characteristics of the detector] Nizhnij Novgorod: Nacional'nyj issledovatel'skij Nizhegorodskij gosudarstvennyj universitet im. N.I. Lobachevskogo [Nizhny Novgorod: National Research Nizhny Novgorod State University. N.I. Lobachevsky]. 2017:52. (In Russ.).

12. Zaikin V.G., Borisov R.S. Overview Obzor. Mass-spektrometriya kak vazhnejshaya analiticheskaya osnova ryada omiksnyh nauk [Mass spectrometry as the most important analytical basis for a number of omics sciences] *Mass-spektrometriya* [Mass spectrometry]. 2021; 1: S. 4-31(In Russ.).

13. Lebedev A.T. Mass-spektrometriya dlya analiza ob"ektov okruzhayushchej sredy [Mass spectrometry for the analysis of environmental objects]. Moskva. Tekhnosfera [Moscow. Technosphere]. 2013: 632. (In Russ.).

14. Pytsky I.S., Kuznetsova E.S., Buryak A.K. Mass-spektrometriya kak sovremennyj metod analiza polimerov [Mass spectrometry as a modern method for the analysis of polymers] *Sorbcionnye i hromatograficheskie process* [Sorption and chromatographic processes]. 2021;1:69-76. (In Russ.).

15. Temerdashev A.Z., Afonin A.S., Korpakova I.G. Hromato-mass-spektricheseskaya identifikaciya komponentnogo sostava vybrosov uglevodorodov pri peregruzke tovarnyh nefteproduktov [Chromatography-mass-spectrometric identification of the component composition of hydrocarbon emissions during the re-loading of commercial petroleum products] *Analitika i kontrol'*[Analytics and control]. 2018;1:35-43.(In Russ.).
16. Spectrometric identification of organic compounds/ R.M. Silverstein, T. Morrill, C. Bassler-John.Wiley & Sons. 1991: 475. ISBN 0-47154-193-1.
17. Zaitseva-Baum E.A. Ferdinand Friedrich V. Reuss und die Mineralwässeruntersuchungen - In: Deutsch-russische Beziehungen in Medizin und Naturwissenschaften. Hgg. D.v.Engelhardt u. I. Kastner. bd. 12. Aachen: Shaker Verlag. 2005: 137-150.
18. Rizzi A. Fundamental aspects of chiral separations by capillary electrophoresis. *Electrophoresis*. 2001; 22: 3079-3106.
19. Handbook of Capillary Electrophoresis.2-nd Ed. J.P. Landers. Boca Raton. FL: CRC Press.1997:912.
20. Shelekhova N.V., Shelekhova T.M., Skvortsova L.I. [et al.] Rasshirenje analiticheskikh vozmozhnostej kapillyarnogo elektroforeza dlya issledovaniya spirtnyh napitkov [Expanding the analytical capabilities of capillary electrophoresis for the study of alcoholic beverages] *Pishchevaya promyshlennost'* [Food industry]. 2019; 11:68-71. (In Russ.). DOI:10.24411/02352486201910181.
21. Shelekhova N.V., Polyakov V.A., Rimareva L.V. Kapillyarnyj elektroforez - vysokoeffektivnyj analiticheskij metod issledovaniya sostava slozhnyh biologicheskikh sred [Capillary electrophoresis - a highly effective analytical method for studying the composition of complex biological media]. *Pivo i napitki*[Beer and drinks]. 2017; 2:34-38.
22. Komarova N.V., Kamentsev Y.S. Prakticheskoe rukovodstvo po ispol'zovaniyu sistem kapillyarnogo elektroforeza KAPEL' [A practical guide to the use of capillary electrophoresis systems KAPEL] SPb.Veda [St. Petersburg.Veda]. 2006:212. (In Russ.).

23. Capillary Electrophoresis: Theory and Practice. Eds. Grossman P.D. and Colburn J.C. San Diego. USA. Academic Press. 1992:352.
24. Zolotov Yu.A. Zvezdy analiticheskogo priborostroeniya. James Waters [Stars of analytical instrumentation. James Waters]. Analitika [Analytics]. 2020; 6: 498-501. (In Russ.).
25. Zolotov Yu.A. Evolyuciya metodov himicheskogo analiza [Evolution of methods of chemical analysis] Vestnik Rossijskoj akademii nauk [Bulletin of the Russian Academy of Sciences]. 2020; 2 S.140-147 (In Russ.).
26. Zolotov Yu.A. Metodologicheskie aspekty analiticheskoy himii [Methodological aspects of analytical chemistry] Zhurnal analiticheskoy himii [Journal of analytical chemistry]. 2021; No 1. S.5-19 (In Russ.).
27. Rudakov O.B., Selemenev V.F. Rossijskaya hromatografiya – vremena i lyudi [Russian chromatography - times and people] Sorbcionnye i hromatograficheskie process [Sorption and chromatographic processes]. 2014 No 3. S. 384-395. (In Russ.).

---

**Шелехова Наталия Викторовна** – д-р техн. наук, заведующая лабораторией хроматографии Всероссийского научно-исследовательского института пищевой биотехнологии

**Рудаков Олег Борисович** – д-р хим. наук, зав. кафедрой химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

**Полянский Константин Константинович** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Коммерция и товароведение» Воронежского филиала Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова

**Рудаков Ярослав Олегович** – инженер кафедры химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

УДК 543.4:621.395.721.5

## **ПРИМЕНЕНИЕ СМАРТФОНА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЦВЕТНЫХ ЧИСЕЛ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ ВО ВНЕЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ**

*Я.О. Рудаков<sup>1\*</sup>, Аббуд Мохамед<sup>1</sup>, О.Б. Рудаков<sup>1</sup>, Л.В. Рудакова<sup>2</sup>, М.С. Букша<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Воронежский государственный технический университет,*

*Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

<sup>2</sup>*Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко,*

*Российская Федерация, 394000, г. Воронеж, ул. Студенческая, 10*

*\*Адрес для переписки: Рудаков Ярослав Олегович, E-mail: rob57@mail.ru*

В цветовой системе RGB с помощью смартфона получены цветометрические характеристики образцов масел: абрикосовой косточки, касторового, репейного, расторопши, облепихи и растворов образцов сравнения (водные растворы йода с иодидом калия), используемых для визуальной оценки цветных чисел по йодной шкале. Показано, что определение цветных чисел растительных масел с применением мобильных цветорегистрирующих устройств пригодно для внелабораторного контроля по параметрам цветности электронных изображений, полученных фотокамерой смартфона. Цветометрическая методика контроля цветности растительных масел с применением смартфонов отличается простотой регистрации видеосигнала, доступностью программного обеспечения для обработки электронных изображений, низкой себестоимостью, экспрессностью единичного анализа, возможностью не только оперативной обработки результатов анализа, но и хранения и передачи полученной информации по мобильной связи. Проведено сравнение методики определения цветных чисел растительных масел с применением смартфона и стандартным визуальным способом, а также с помощью спектрофотометра. Показано, что разработанная методика более точно регистрирует цветные числа, чем визуальная, и пригодна для их регистрации в более широком диапазоне, чем спектрофотометрический способ.

**Ключевые слова:** *смартфон, цифровая цветометрия, цветовая система RGB, цветное число, растительные масла*

## THE USE OF A SMARTPHONE TO CONTROL THE COLOR NUMBERS OF VEGETABLE OILS IN OUT-OF-LABORATORY CONDITIONS

*Ya.O. Rudakov<sup>\*1</sup>, Abboud Mohamed<sup>1</sup>, O.B. Rudakov<sup>1</sup>, L.V. Rudakova<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Voronezh State Technical University,*

*Russian Federation, 394006, Voronezh, ul. 20-letiya Oktyabrya, 84*

<sup>2</sup>*Voronezh State Medical University,*

*Russian Federation, 394000, Voronezh, ul. Studencheskaya str. 10*

*\*Correspondence address: Yaroslav O. Rudakov, E-mail: robi57@mail.ru*

In the RGB color system, using a smartphone, colorimetric characteristics of oil samples were obtained: apricot kernel, castor, burdock, milk thistle, sea buckthorn and solutions of comparison samples (aqueous solutions of iodine with potassium iodide) used for visual evaluation of color numbers on the iodine scale. It is shown that the determination of the color numbers of vegetable oils using mobile color-recording devices is suitable for out-of-laboratory control of the color parameters of electronic images obtained by a smartphone camera. The colorimetric technique of controlling the chromaticity of vegetable oils using smartphones is characterized by the simplicity of recording a video signal, the availability of software for processing electronic images, low cost, the expressiveness of a single analysis, the ability not only to process the analysis results quickly, but also to store and transmit the information received via mobile communication. A comparison of the methodology for determining the color numbers of vegetable oils using a smartphone and a standard visual method, as well as using a spectrophotometer, was carried out. It is shown that the developed technique registers color numbers more accurately than the visual one and is suitable for their registration in a wider range than the spectrophotometric method.

**Keywords:** *smartphone, digital colorometry, RGB color system, color number, vegetable oils*

**Введение.** В работе [1] для оценки цветности растительных масел (цветных чисел) с применением цифровой цветометрии (ЦЦМ) в качестве регистрирующего устройства применяли цифровые фотоаппараты и планшетные сканеры. Полученные электронные изображения в этой работе обрабатывали в формате JPG с помощью программы Adobe Photoshop CS или в оболочке ПО Math CAD. Разработанные методики [1] вошли в учебное пособие [2] и были реко-

мендованы для внедрения в аналитическую практику. Цветное число растительных масел является интегральной характеристикой, связанной с наличием в маслах каротина, ксантофиллов, хлорофиллов, и других липофильных компонентов. Интенсивность окраски (цветное число) масел, обратно пропорционально степени их очистки. Цветное число является безразмерной величиной в диапазоне от 0 до 100, оно определяется сравнением интенсивности образца масла с окраской стандартных растворов йода по йодной шкале [2]. Рафинированные, дезодорированные масла высшего сорта, должны иметь значение цветного числа меньше 6, ординарные сорта - до 10, нерафинированные от 15 до 35. Для некоторых масел, выбранных для исследования, показатели цветности не нормированы, эти масла не подвергают рафинированию и дезодорированию, так как они применяются как биологически активные добавки в пищу, либо как косметическая или фармакологическая продукция. Они по определению кроме триглицеридов содержат в своем составе разнообразные БАВ, поэтому могут иметь большие цветные числа.

В обзорах [3-4] показано, для задач ЦЦМ стали активно использовать смартфоны, которые оснащены цифровыми камерами, имеющими параметры, близкие к цифровым фотокамерам. Смартфоны как радиотехнические устройства совмещают в себе функции приема и передачи информации с помощью электронной почты, мессенджеров, HTML-браузеров, цифрового фотоаппарата, многозадачного мини-компьютера для памяти или возможности хранить и перерабатывать информацию, используя облачные технологии. Для смартфонов специально разработана широкая линейка программного обеспечения по обработке электронных изображений [3], имеются табличные процессоры, калькуляторы для мобильных телефонов, например, Microsoft Excel: Spreadsheets, которые позволяют выполнять статистико-математическую обработку результатов, построение градуировочных уравнений непосредственно на смартфоне.

Целью данной работы явилось изучение возможностей ЦЦМ с применением смартфонов во внелабораторном контроле цветных чисел растительных масел.

**Экспериментальная часть.** В качестве объекта исследования использовали масла: абрикосовой косточки (изготовитель ООО «Ботаника», г. Москва, касторового (ОАО «Самарамедпром», г. Самара), репейного с добавкой касторового (ООО Миролла Лаб, Ленинград. обл., п. Кузьмолловский), расторопши (ООО «Натуральные масла», Московск. обл., г. Солнечногорск), облепихи (ООО «Натуральные масла», Московск. обл., г. Солнечногорск). Изображения градуировочных растворов иода и образцов масел получали с применением смартфона Realme C11 2021 в режиме фотовспышки. Разрешение тыловой камеры 8 Мп. Искусственное освещение (300 люкс). Растворы и образцы масел помещали в 150 мм от смартфона в стандартные стеклянные кюветы для фотоколориметров,  $l=5.07$  мм. За и под кюветами применяли в качестве фона белую бумагу Valett Classic. Изображения обрабатывали в ПО для смартфона Color Picker 5.0.6. Для этого выделяли фрагмент изображения в виде круга диаметром 10 мм, регистрировали усредненные значения интенсивности компонент RGB. Для сравнения применяли визуальную методику оценки цветного числа и его спектрофотометрическое определение при 450 нм на приборе СФ-2000, в кюветках с  $l=10$  мм.

**Результаты и их обсуждение.** Зависимости интенсивности индивидуальных компонент цветности  $F_i$  от цветного числа ( $Z$ ) в йодной шкале носят нелинейный характер, что было установлено еще в работе [1]. В нашем эксперименте эти наблюдения подтвердились. При этом интенсивность компонент цветности FR и FG в диапазоне  $Z=1-30$  меняется сравнительно слабо от 186 до 175 для FR и от 185 до 157 для FG. В тоже время интенсивность голубой компоненты FB резко падает от 185 до 0. Для нивелирования этого эффекта в качестве аналитического сигнала использовали не отдельные компоненты, а их суммы  $\Sigma F_i$ , которые также изменялись не линейно (рис. 1). Для их линейзации использовали полулогарифмические анаморфозы. Еще одна проблема при использовании ЦЦМ, особенно для внелабораторных условий, это сложность обеспечения одинаковых условий освещенности при регистрации образцов. Для ее решения мы использовали фотографирование при искусственном свете в 300 люкс, и са-

мое главное, наряду с анализируемыми пробами в этих же условиях регистрировали параметры цветности градуировочных растворов и образца сравнения – практически бесцветного вазелинового масла медицинского (ГОСТ 3164-78), т.е. для градуировки использовали относительные значения сумм компонент цветности пробы и образца сравнения  $\Sigma F_i / \Sigma F'_i$ . В табл. 1 представлены относительные суммы усредненных значений интенсивности компонент RGB для разных растворов йодной шкалы, а на рис. 2 – градуировочный график и градуировочное линейное уравнение с высокой степенью детерминации для определения цветного числа растительных масел (PM) методом ЦЦМ, а на рис. 3 – методом спектрофотометрии (СФ) с аналитической волной 450 нм.

Таблица 1

Градуировочные данные по йодной шкале

Цветное число, Z	$\Sigma F_i / \Sigma F'_i$
1	1.000
5	0.777
10	0.745
15	0.657
20	0.638
25	0.596
30	0.607

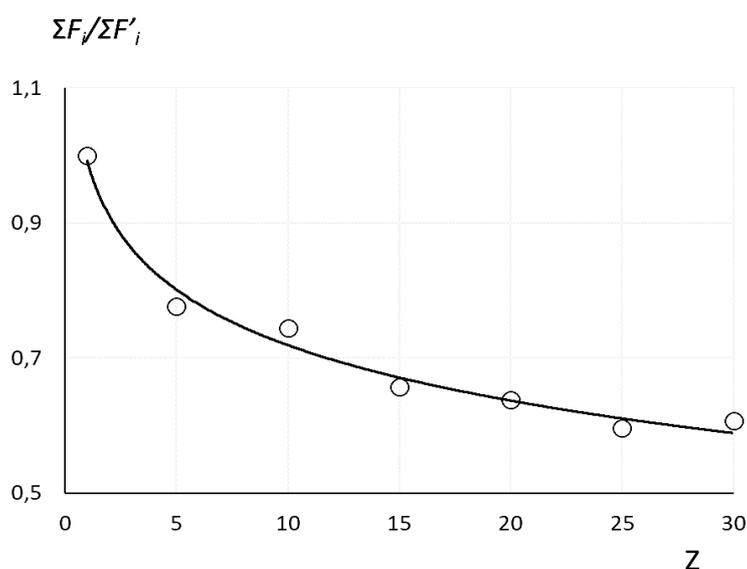


Рис. 1. Зависимость отношения сумм интенсивностей компонент RGB растворов йода и вазелинового масла  $\Sigma F_i / \Sigma F'_i$  от цветного числа Z

В табл. 2 приведены результаты определения интенсивностей  $F_i$  и цветных чисел  $Z$ , полученных 3 способами. Из них можно сделать вывод, что способом ЦЦМ можно более точно определить значения  $Z$ , чем визуальным способом.

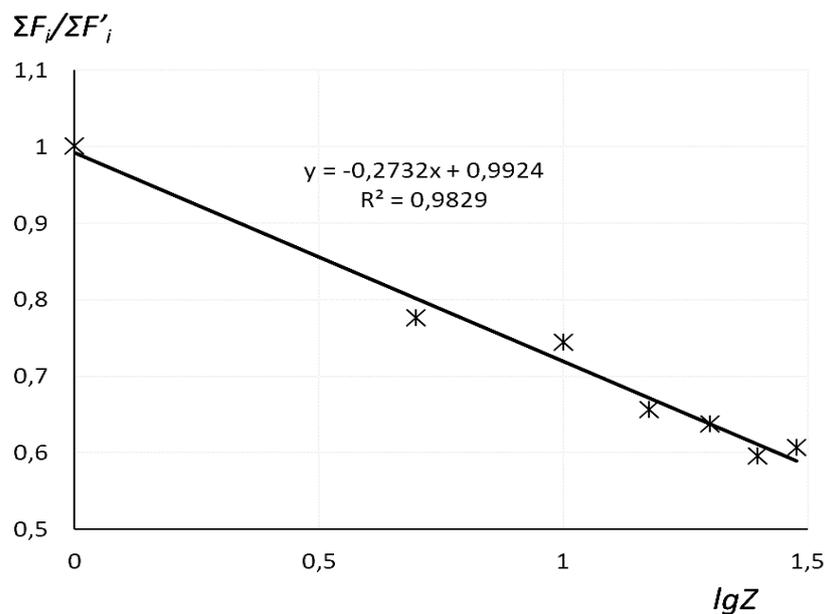


Рис. 2. Градуировочный график для определения цветности РМ

Таблица 2

Параметры цветности РМ и значения  $Z$

Масло	FR /F'R	FG/F'G	FB/F'B	$\Sigma F_i/\Sigma F'_i$	Z, ЦЦМ	Z, визуально	Z, СФ
Репейное с добавкой касторового	171	172	163	506	1.8	2-3	2.1
	0.94	0.95	0.88	0.92			
Абрикосовой косточки	172	173	168	513	1.7	2-3	1.9
	0.95	0.96	0.90	0.93			
Расторопши	162	171	82	415	7.1	5-10	7.5
	0.89	0.94	0.44	0.76			
Касторовое	177	177	170	524	1.4	2	1.7
	0.97	0.98	0.91	0.95			
Облепиховое	181	82	2	265	70.8	>30	>30
	0.99	0.45	0.01	0.48			
Вазелиновое (образец сравнения)	182	181	186	549	1	1	1.1

Вместе с тем можно сказать о хорошем соответствии результатов определения тремя методами. В тоже время по цветометрической градуировке можно рассчитать  $Z$  интенсивно окрашенного облепихового масла. Большая оптическая плотность облепихового масла не позволяет достоверно определять его цветное число спектрофотометрическим способом. Как видно из рис. 3 уже для цветного числа  $Z=20$  оптическая плотность  $A>1.0$ , в то время как минимальная погрешность методик СФ наблюдается при  $A<0.3$  и со столь высокими оптическими плотностями ( $A>1.0$ ) ввиду больших погрешностей не рекомендуется выполнять количественных измерения.

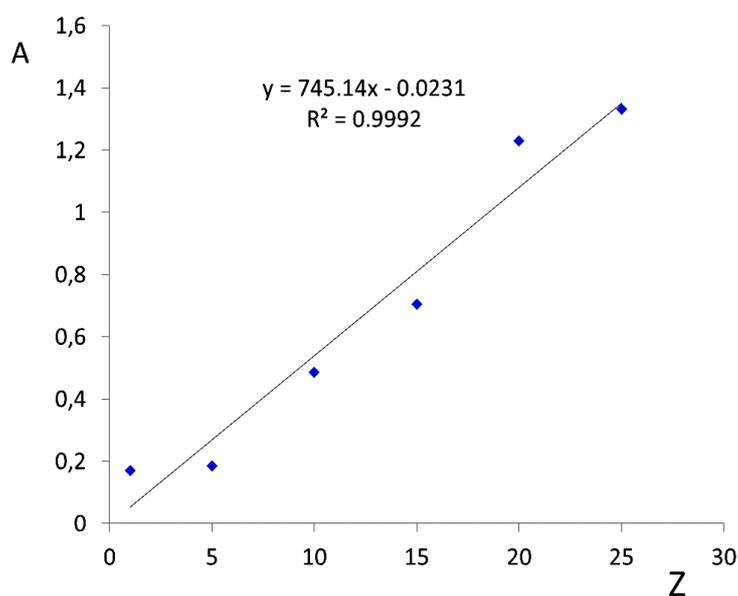


Рис. 3. Градуировочный график и уравнение для иодной шкалы при спектрофотометрическом определении  $Z$

**Заключение.** Таким образом, количественно охарактеризованы 5 образцов РМ, применяемых в качестве БАД по йодной шкале. Сравнение коэффициентов детерминации  $R^2$  методики ЦЦМ и СФ, показывает, что спектрофотометрическая методика более точно регистрирует цветные числа, чем ЦЦМ, однако последняя пригодна для регистрации  $Z$  в более широком диапазоне, чем спектрофотометрический способ, для нее можно использовать даже малобюджетные смартфоны типа Realme C11 2021, его стоимость составляет меньше 10

тыс. рублей, в то время как бюджетные спектрофотометры стоят от 75 до 250 тыс. рублей. Показана возможность применения смартфонов для контроля цветных чисел растительных масел во внелабораторных условиях.

### **Список литературы**

1. Хрипушин В.В., Рудакова Л.В., Рудаков О.Б., Байдичева О.В. Цветометрические методики определения цветного числа растительных масел // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т. 74. № 5. С. 9-13.

2. Рудаков О.Б., Королькова Н.В., Полянский К.К. [и др.]. Технохимический контроль в технологии жиров и жирозаменителей [Technochemical control in the technology of fats and fat substitutes]. Санкт-Петербург: Изд-во «Лань». 2020. 576 с.

3. Апяри В.В., Горбунова М.В., Исаченко А.И. [и др.]. Использование бытовых цветорегистрирующих устройств в количественном химическом анализе // Журн. аналитич. химии 2017. Т.72. №11. С. 963-977.

4. Черноусова О.В., Рудаков О.Б. Цифровые изображения в аналитической химии для количественного и качественного анализа // Химия, физика и механика материалов. 2019. № 2. С. 55-125.

### **References**

1. Hripushin V.V., Rudakova L.V., Rudakov O.B., Bajdicheva O.V. Cvetometricheskie metodiki opredeleniya cvetnogo chisla rastitel'nyh masel // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Colorometric methods for determining the color number of vegetable oils// Factory laboratory. Diagnostics of materials]. 2008. T. 74. № 5. S. 9-13. (in Russian).

2. Rudakov O.B., Korol'kova N.V., Polyanskij K.K. [i dr.]. Tekhnohimicheskij kontrol' v tekhnologii zhиров i zhirozamenitelej. Sankt-Peterburg: Izd-vo «Lan». 2020. 576 p. (in Russian).

3. Аpyari V.V. Gorbunova M.V., Isachenko A.I. [i dr.]. Ispol'zovanie bytovyh cvetoregistriruyushchih ustrojstv v kolichestvennom himicheskom analize // Z. Hur-nal analiticheskoy himii [The use of household color-recording devices in quantitative chemical analysis // Journal of analytical chemistry]. 2017. T.72. №11. P. 963-977. (in Russian).

4. CHernousova O.V., Rudakov O.B. Cifrovye izobrazheniya v analiticheskoy himii dlya kolichestvennogo i kachestvennogo analiza // Himiya, fizika i mekhanika materialov [Digital images in analytical chemistry for quantitative and qualitative analysis // Chemistry, Physics and Mechanics of Materials]. 2019. № 2. P. 55-125. (in Russian).

---

**Рудаков Ярослав Олегович** – инженер кафедры химии и химической технологии материа-лов Воронежского государственного технического университета, аспирант кафедры анали-тической химии Воронежского государственного университета

**Мохамед Аббуд** – аспирант кафедры химии и химической технологии материалов Воронеж-ского государственного технического университета

**Рудаков Олег Борисович** – д-р хим. наук, профессор, зав. кафедрой химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

**Рудакова Людмила Васильевна** - д-р хим. наук, доцент, зав. кафедрой фармацевтической химии и фармацевтической технологии ВГМУ им. Н.Н. Бурденко

**Букша Максим Сергеевич** – студент 5-го курса лечебного факультета Воронежского госу-дарственного медицинского университета им. Н.Н. Бурденко

УДК 66.081.6

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИФфуЗИОННОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ  
АЦЕТАТЦЕЛЛЮЛОЗНОЙ МЕМБРАНЫ МГА-95 ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ  
РАСТВОРОВ, СОДЕРЖАЩИХ КАТИОНЫ НИКЕЛЯ (II)**

*С.И. Лазарев<sup>1\*</sup>, К.В. Шестаков<sup>1</sup>, П.А. Хохлов<sup>1</sup>, К.К. Полянский<sup>2</sup>,  
Д.С. Лазарев<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Тамбовский государственный технический университет,  
Российская Федерация, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106*

*<sup>2</sup>Воронежский филиал Российского экономического университета  
им. Г.В. Плеханова,*

*Российская Федерация, 394030, г. Воронеж, ул. Карла Маркса, 67А*

*\*Адрес для переписки: Лазарев Сергей Иванович, E-mail: mig@tstu.ru*

Данные, описывающие перенос веществ через мембрану, играют важную роль в расчетах электроультрафильтрационных и электрогиперфильтрационных аппаратов и при выборе оптимальных технологических режимов их работы. В работе исследована электродиффузионная проницаемость ацетатцеллюлозной мембраны МГА-95 при разделении водных растворов с массовой концентрацией Ni(II) от 40 до 160 мг/л. Обнаружено, что при разделении всех исследованных растворов значения коэффициента электродиффузионной проницаемости  $P_{эд}$  снижаются в пределах 35 – 50% при увеличении накладываемого на мембранную систему напряжения с 19 до 28 В. При расчетах достигнуто приемлемое расхождение между экспериментальными и теоретически рассчитанными значениями, не превышающее 5 – 7%.

**Ключевые слова:** мембрана, электродиффузия, проницаемость, разделение растворов, катионы металлов

**THE ELECTRODIFFUSION PERMEABILITY INVESTIGATION OF THE  
CELLULOSE ACETATE MEMBRANE MGA-95 DURING SOLUTION  
SEPARATION CONTAINING NICKEL (II) CATIONS**

*S.I. Lazarev<sup>1\*</sup>, K.V. Shestakov<sup>1</sup>, P.A. Khokhlov<sup>1</sup>, K.K. Polyanskiy<sup>2</sup>, D.S. Lazarev<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Tambov State Technical University,*

*Russian Federation, 392000, Tambov, ul. Sovetskaya, 106*

*<sup>2</sup>Voronezh Branch of RUE named after G.V. Plekhanov,*

*Russian Federation, 394030, Voronezh, ul. Karla Marksa, 67A*

*\*Corresponding author: Sergey I. Lazarev, E-mail: mig@tstu.ru*

The data describing a substance transfer through a membrane play an important role in the calculations of electroultrafiltration and electrohyperfiltration apparatuses and in a selection of optimal technological modes of their operation. The electrodiffusion permeability of the cellulose acetate membrane MGA-95 was studied during the separation of aqueous solutions with a mass concentration of Ni (II) from 40 to 160 mg/l. It was found that the values of the electrodiffusion permeability coefficient  $P_{ed}$  decrease in the range of 35-50% with an increase in the voltage applied to the membrane system from 19 to 28 V during separating all the studied solutions. During the calculations, an acceptable discrepancy between the experimental and theoretically calculated values was achieved not exceeding 5 – 7%.

**Keywords:** *membrane, electrodiffusion, permeability, separation of solutions, metal cations*

**Введение.** Массоперенос растворенных веществ при электробаромембранном разделении растворов осуществляется благодаря целому ряду движущих сил и разделяется на конвективную, диффузионную и электродиффузионную составляющие [1-5]. Данные, описывающие перенос веществ через мембрану, играют важную роль в расчетах электроультрафильтрационных и электрогиперфильтрационных аппаратов и при выборе оптимальных технологических режимов их работы. Однако следует заметить, что экспериментально определить коэффициент электродиффузии достаточно сложно. В данном случае для описания массопереноса веществ рекомендуется использовать прони-

цаемость мембраны по растворенному веществу. Определить проницаемость мембраны можно в результате эксперимента [6].

В данной работе представлено исследование электродиффузионной проницаемости ацетатцеллюлозной мембраны МГА-95 при разделении водных растворов, содержащих катионы Ni (II).

**Экспериментальная часть.** Для серии экспериментальных исследований использовалась лабораторная ячейка (рис. 1), выполненная из оргстекла и состоящая из двух камер, разделенных двумя полимерными решетками, между которыми располагается полупроницаемая мембрана. Электрическое поле подводилось к системе посредством двух электродов, расположенных в камерах ячейки.

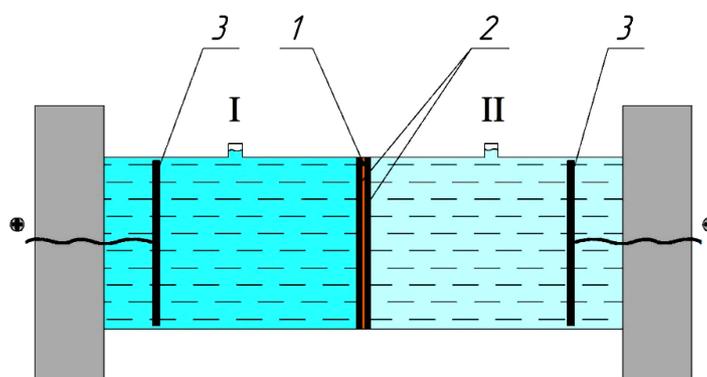


Рис. 1. Лабораторная ячейка для исследования электродиффузионной проницаемости мембран: 1 – мембрана, 2 – решетки, 3 – электроды

Объектом исследования была выбрана ацетатцеллюлозная мембрана МГА-95. В качестве рабочих растворов использовались модельные водные растворы  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  с массовой концентрацией катионов Ni (II) от 40 до 160 мг/л. Рабочие параметры экспериментов: подаваемое напряжение  $U$  – от 19 до 28 В, плотность тока  $i$  – от 0 до 40  $\text{A}/\text{m}^2$ , скорость перемешивания  $v_{\text{пер}}$  – 200 об/мин, объем 1 камеры разделения  $V$  – 0,6  $\text{дм}^3$ , время проведения  $\tau$  – 5 ч., абсолютная температура раствора  $T$  – 293 К.

Экспериментально коэффициент электродиффузионной проницаемости  $P_{\text{эд}}$  определялся с учетом количества перенесенного вещества через мембрану по формуле (1) [6]:

$$P_{\text{эд}} = \frac{M}{F_{\text{м}} \cdot \tau \cdot i}, \quad (1)$$

где  $M$  – масса перенесенного вещества, кг;  $F_M$  – площадь рабочей поверхности мембраны, м<sup>2</sup>;  $\tau$  – время проведения эксперимента, ч;  $i$  – плотность тока, А/м<sup>2</sup>.

Теоретический расчет коэффициента электродиффузионной проницаемости  $P_{эд}$  производился по формуле (2) [6]:

$$P_{эд} = k \cdot C^n \cdot i^m \cdot \exp(C \cdot g) \cdot \exp(A/T), \quad (2)$$

где  $C$  – концентрация вещества в исходном растворе, кг/м<sup>3</sup>;  $k$ ,  $n$ ,  $m$ ,  $g$ ,  $A$  – безразмерные эмпирические коэффициенты;  $T$  – абсолютная температура раствора, К.

**Результаты и обсуждение.** Полученные в ходе экспериментов данные по переносу вещества через мембрану были использованы для экспериментального расчета коэффициента электродиффузионной проницаемости  $P_{эд}$ , представленного на рис. 2, по формуле (1). Также на данном рисунке представлены и данные теоретического расчета коэффициента  $P_{эд}$ .

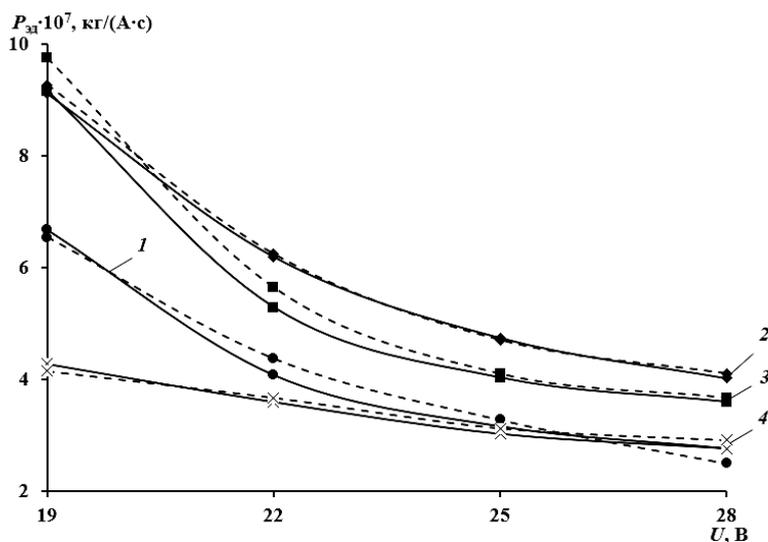


Рис. 2. Зависимости коэффициента электродиффузионной проницаемости  $P_{эд}$  от накладываемого на мембранную систему напряжения при исходной массовой концентрации катионов Ni (II): 1 – 40 мг/л, 2 – 80 мг/л, 3 – 120 мг/л, 4 – 160 мг/л. Сплошной линией обозначены экспериментальные данные, пунктирной линией – теоретически рассчитанные

Анализ представленных данных позволяет сделать вывод, что при разделении всех исследованных растворов значения коэффициента электродиффузионной проницаемости  $P_{эд}$  снижаются в пределах 35 – 50% при увеличении накладываемого на мембранную систему напряжения с 19 до 28 В. Кроме того, не прослеживается четкая зависимость  $P_{эд}$  от изменения концентрации исходного раствора. Следует также отметить, что расхождение между экспериментальными и теоретически рассчитанными значениями не превышает 5-7%.

**Заключение.** В работе представлен электродиффузионная проницаемость ацетатцеллюлозной мембраны МГА-95 при разделении водных растворов с массовой концентрацией Ni (II) от 40 до 160 мг/л. Выявлено снижение значения коэффициента электродиффузионной проницаемости на 30-50% при увеличении накладываемого на мембранную систему напряжения. При расчетах достигнуто приемлемое расхождение между экспериментальными и теоретически рассчитанными значениями, не превышающее 5-7%.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90024.*

### **Список литературы**

1. Заболоцкий В.И., Никоненко В.В. Перенос ионов в мембранах. М.: Наука. 1996. 392 с.
2. Shestakov K.V. et al. The prediction of the electrochemical baromembrane separation process of industrial solutions based on the friction theory // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2021. N. 6. P. 1219-1228.
3. Mulder M. Basic Principles of Membrane Technology. Haarlem: Springer Netherlands. 1996. 564 p.
4. Lazarev S.I. et al. A Mathematical Description of Mass Transfer and a Technique of Calculating the Local Mass-Transfer Coefficients in the Inter-Membrane Channel of Baromembrane Roll Elements // Chemical and Petroleum Engineering. 2019. Vol. 54. P. 644-650.
5. Bhadauria R., Aluru N.R. Multiscale modeling of electroosmotic flow: Effects of discrete ion, enhanced viscosity, and surface friction // The Journal of Chemical Physics. 2017. V. 146. № 18. P. 184106.
6. Чепеняк П.А., Головашин В.Л., Лазарев С.И. Электродиффузионная проницаемость ультрафильтрационных мембран в водных фосфатсодержащих растворах // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. 2012. №8. С. 52-56.

### **References**

1. Zabolotskii V.I., Nikonenko V.V. Perenosionov v membranakh. Moscow: Nauka. 1996. 392 p. (in Russian)

2. Shestakov K.V. et al. The prediction of the electrochemical baromembrane separation process of industrial solutions based on the friction theory // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2021. N. 6. P. 1219-1228.
3. Mulder M. Basic Principles of Membrane Technology. Haarlem: Springer Netherlands. 1996. 564 p.
4. Lazarev S.I. et al. A Mathematical Description of Mass Transfer and a Technique of Calculating the Local Mass-Transfer Coefficients in the Inter-Membrane Channel of Baromembrane Roll Elements // Chemical and Petroleum Engineering. 2019. Vol. 54. P. 644-650.
5. Bhadauria R., Aluru N.R. Multiscale modeling of electroosmotic flow: Effects of discrete ion, enhanced viscosity, and surface friction // The Journal of Chemical Physics. 2017. V. 146. № 18. P. 184106.
6. Chepenyak P. A., Golovashin V. L., Lazarev S. I. Elektrodifuzionnaya pronitsaemost' ul'trafil'tratsionnykh membran v vodnykh fosfatsoderzhashchikh rastvorakh // Izvestiya VUZov. Khimiya i khimicheskayatekhnologiya. 2012. №8. P. 52-56. (in Russian)

---

**Лазарев Сергей Иванович** – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Механика и инженерная графика» Тамбовского государственного технического университета

**Шестаков Константин Валерьевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Механика и инженерная графика» Тамбовского государственного технического университета

**Хохлов Павел Анатольевич** – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика» Тамбовского государственного технического университета

**Полянский Константин Константинович** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры коммерции и товароведения Воронежского филиала Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова

**Лазарев Дмитрий Сергеевич** – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика» Тамбовского государственного технического университета

УДК 504.455/504.064

**ВОРОНЕЖСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ: О НЕОБХОДИМОСТИ  
АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ  
ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ**

*Н.Д. Разиньков, Т.В. Овчинникова\*, И.М. Винокурова, Н.С. Полянская*

*Воронежский государственный технический университет,  
Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

*\*Адрес для переписки: Винокурова Ирина Михайловна,*

*E-mail: vinokurovai@bk.ru*

Воронежское водохранилище появилось в 1972 г. на реке Воронеж. Оно является одним из крупнейших в мире водохранилищ, которое целиком расположено в черте города Воронежа. В 70-е годы прошлого века, горожане называли его «Воронежским морем», а уже в начале XXI века оно стало приобретать дурную славу разносчика зловонного запаха от канализационных сбросов и гниющих сине-зелёных водорослей. Авторами предлагаются следующие меры по активному управлению гидрологической природно-технической системой – Воронежское водохранилище: разработать «Правил использования Воронежского водохранилища», учитывая его современное состояние, застройку в прибрежной части, особенности техногенной нагрузки с учетом перспективы развития города; провести практическую работу по мониторингу состояния качества воды и донных отложений водохранилища; по санитарно-химическим и микробиологическим показателям; установить фактическую антропогенную нагрузку на водоём с фиксированием всех санкционированных и несанкционированных сбросов; рассчитать способность водоёма к самоочищению с учётом максимально возможных известных сбросов и вновь выявленных источников загрязнений; разработать технико-экономическое обоснование по прекращению (минимизации) неканализованных стоков, ливневых сбросов, недоочищенных сточных вод с селитебных территорий; оценить возможность и этапность реализации канализования частного сектора прибрежных селитебных территорий города; строительства очистных сооружений ливневой канализации, по мере уменьшения сбросов произвести зарыбление водоёма видами, ориентированными на потребление сине-зелёных водорослей.

*Ключевые слова: водохранилище, вода, грунт, мелководье, сточные воды, половодье, гидроузел*

## **VORONEZH RESERVOIR: ON THE NEED FOR ACTIVE MANAGEMENT OF THE HYDROLOGICAL NATURAL-TECHNICAL SYSTEM**

*N.D. Razinkov, T.V. Ovchinnikova\*, I.M. Vinokurova, N.S. Polyanskaya*

*Voronezh State Technical University,  
Russian Federation, 394006, Voronezh, ul. 20-letia Oktiabria, 84*

*\*Corresponding author: Vinokurova Irina Mikhailovna,  
E-mail: vinokurovai@bk.ru*

Voronezh reservoir appeared in 1972 on the Voronezh River. It is one of the world's largest reservoirs, which is located entirely within the city of Voronezh. In the 70s of the last century, the townspeople called it the «Voronezh Sea», and at the beginning of the 21st century it began to acquire a bad name of a carrier of foul-smelling smell from sewer discharges and rotting blue-green algae. The authors propose the following measures for the active management of the hydrological natural and technical system - the Voronezh reservoir: to develop «Rules for the use of the Voronezh reservoir», taking into account its modern state, development in the coastal part, features of man-made load taking into account the prospects for the development of the city; carry out practical work on monitoring the state of water quality and bottom sediments of the reservoir; on sanitary-chemical and microbiological indicators; establish the actual anthropogenic load on the reservoir with the recording of all authorized and unauthorized discharges; calculate the capacity of the reservoir for self-cleaning, taking into account the maximum possible known discharges and newly identified sources of pollution; To develop a feasibility study on the cessation (minimization) of unmanalized effluents, storm discharges, under-treated wastewater from settlement areas; Assess the possibility and stage of implementing the sewerage of the private sector of the coastal settlement areas of the city; construction of storm sewage treatment facilities, as discharges decrease, the water body should be buried with species oriented to consumption of blue-green algae.

**Keywords:** *reservoir, water, soil, shallow water, sewage, flood, hydro node*

Административные власти города и региона стремятся максимально повысить рекреационное свойство водоёма и прибрежной зоны с целью привлечения туристов в миллионный город. Однако всем этим замыслам невозможно реализоваться в полной мере из-за крайне низкого качества воды в водохранилище, уже несколько десятков лет региональная санитарная служба не рекомендует купаться в водохранилище.

У авторов, в рамках деятельности Экспертного совета при областной комиссии по чрезвычайным ситуациям и обеспечению пожарной безопасности появилась возможность изучить материал, предоставленный Воронежским филиалом ФГУ «Центр лабораторного анализа и технических измерений по ЦФО», Воронежским гидрометеоцентром, ООО «РВК-Воронеж» (Воронежским водоканалом), территориальным управлением Росприроднадзора.

По результатам исследования в настоящее время Воронежское водохранилище используется в следующих направлениях: водоём рыбохозяйственного назначения; источник подпитки питьевых водозаборов г. Воронежа в объёме от 45 до 75%; ёмкость для сбора очищенных сточных и неочищенных ливневых стоков; зона отдыха населения города.

Наряду с разработкой проектов повышения рекреационной привлекательности водохранилища практически ежегодно в разных местах и с разной интенсивности ведутся работы по отсыпке грунта на мелководье и дноуглубительные работы. Данные мероприятия рассматриваются с позиции улучшения экологического состояния водоема [3, 5, 7, 8].

Однако эффективность локальных дноуглублений не подтверждается предыдущим опытом по ликвидации мелководий, в процессе создания намывных участков. График изменения суммарной площади водохранилища демонстрирует её уменьшение на 315 га, что составляет 5 % от общей площади. Анализируемые мониторинговые данные качества воды в водоёме показывают, что проводимые дноуглубительные работы не только не дают положительного эффекта, но и приводят к ухудшению его качества, за счёт подъёма со дна загрязнённых устоявшихся грунтов на поверхность [4].

Дноуглубление невозможно в районах мостовых переходов, проходов иных коммуникаций с точки зрения их безопасности и существующих нормативных документов. Проект моста делался с учётом существующих скоростей потока, морфологии дна и слагающих пород, что предполагает реконструкцию моста, в противном случае может произойти сползание опор. Проведение дноуглубительных работ требует гидрологических и технических расчётов (подтверждающих надёжность гидротехнических сооружений) и обеспечивают устойчивость всей гидрологической природно-технической системы в условиях нештатных и аварийных ситуаций.

При проектировании Воронежского гидроузла учитывался гидрологический режим только р. Воронеж, без учёта подпора р. Дон во время половодья. Ранее при выдающихся половодьях (за последние сто лет) которые возникали в: 1917, 1929, 1942, 1945, 1947, 1970 и 1971 годах, на р. Дон может происходить «запирание» водосброса гидроузла с обратным течением [1].

В случае принятия инженерных решений по верхнему бьефу, влияющему на морфометрические характеристики водоёма, необходимо провести новые гидрологические расчёты с планируемыми и проведёнными изменениями в чаше водохранилища, с учетом существенного влияния на расход водосброса гидроузла р. Дон во время половодья [4].

Работы по сужению берегов (ликвидация мелководий) требуют предварительного проведения эколого-геохимических исследований с разработкой рекомендаций по обоснованию глубин и контуров изменения берега.

Существенной проблемой для Воронежского водохранилища является отсутствие «Основные положения правил», которые отражают особенности использования водоема в соответствии с его современным состоянием, учитывая проведенные мероприятия по «сужению» берегов и экологической деградации.

При строительстве Воронежского гидроузла были разработаны «Основные положения правил», которые рассмотрены и согласованы руководящими органами того времени [6].

В 2014-2015 годах была предпринята попытка разработать обновленный вариант «Правил использования Воронежского водохранилища», она без успешно провалилась (заказчиком выступало ДБВУ Агентства водных ресурсов МПР России), так как исходная информация базировалась на старых документах – «Воронежское водохранилище. Основные положения правил использования водных ресурсов» (г. Ленинград, 1973 г.)», гидрологические и гидрогеологические изыскания не были проведены на должном уровне. Как результат, появились существенные замечания, которые разработчиком не были доработаны и исправлены.

В последние десятилетия происходит невыполнение изначальных правил от 1973 г., (параграф 24): «Сброс неочищенных сточных вод и каких-либо отбросов в водохранилище запрещены. Условия сброса сточных вод в водохранилище после их очистки в каждом отдельном случае подлежат согласованию...». [9, 10, 11, 12]

До недавнего времени вокруг водохранилища проживало в частных домах до 21 тыс. человек, в подавляющем случае жилые дома не канализованы, сброс вод осуществляется в прибрежные выгребные ямы или сбрасываются напрямую в водохранилище по проложенным трубам, ООО «Левобережные очистные сооружения» (далее – ЛОС) также разгружаются в водохранилище [2]. ООО «ЛОС» находится на левом берегу Воронежского водохранилища в черте г. Воронежа (рис. 1), что само по себе является предметом для обсуждения о целесообразности такого размещения. Территориальным органом Росприроднадзора по Воронежской области на ООО «ЛОС» утвердил беспрецедентный размер ущерба в сумме 725,76 млн. руб. 01.03.2021.



Рис. 1. Левобережные очистные сооружения: фактическая производительность свыше 60 тыс. кубометров в сутки (стрелкой указано место сброса условно очищенных вод)

В создавшейся ситуации коллективу авторов представляются следующие меры по активному управлению гидрологической природно-технической системой – Воронежское водохранилище:

1. Вернуться к разработке «Правил использования Воронежского водохранилища», учитывая его современное состояние, застройку в прибрежной части, особенности техногенной нагрузки с учетом перспективы развития города. Расширить возможности по изменению режимов работы Воронежского гидроузла, в части принятия решений по предупредительной сработке водохранилища.

2. Для обеспечения достоверных данных провести: научно практическую работу по мониторингу состояния качества воды и донных отложений водохранилища; по санитарно-химическим и микробиологическим показателям; установить фактическую антропогенную нагрузку на водоём с фиксированием всех санкционированных и несанкционированных сбросов; рассчитать способность водоёма к самоочищению с учётом максимально возможных известных сбросов и вновь выявленных источников загрязнений.

3. Требуется разработать технико-экономическое обоснование по прекращению (минимизации) неканализованных стоков, ливневых сбросов, недоочищенных сточных вод с селитебных территорий; оценить возможность и этапность реализации канализования частного сектора прибрежных селитебных территорий города; строительства очистных сооружений ливневой канализации.

4. В соответствии с компетенцией городской администрации добиться исключения сброса неочищенных стоков, принять решение по каждому источнику загрязнения: прекращения или ограничения по сбросу, в первую очередь ООО «ЛЮС»; актуализировать использование ГБП (гидрботанические площадки или биоплато) в местах сбросов высоко загрязнённых вод; по мере уменьшения сбросов произвести зарыбление водоёма видами, ориентированными на потребление сине-зелёных водорослей.

О значении воды в жизни человека хорошо сказал Антуан де Сент-Экзюпери: «У тебя вода, нет ни вкуса, ни цвета, ни запаха, тебя невозможно описать, тобой наслаждаются, не ведая, что ты такое... ты самое большое богатство в мире». Речь идет о пресной воде, которая в наши дни стала играть роль стратегического экологического ресурса.

### **Список литературы**

1. Мишон В.М. Река Воронеж и её бассейн: ресурсы и водно-экологические проблемы. Воронеж: Издательство ВГУ, 2000. 296 с.

2. Разиньков Н.Д. Гидрологические природно-технические системы: проблемы и региональный опыт управления. Монография. / Разиньков Н.Д., Овчинникова Т.В., Куприенко П.С., Ашихмина Т.В. Корпусов А.Ю. Воронеж: Издательство «Цифровая полиграфия», 2019. 132 с.

3. СП 58.13330.2012 Свод правил. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003.

4. Разиньков Н.Д., Куприенко П.С., Овчинникова Т.В. Эколого-геодинамические и природно-технические системы. Сборник. Издание первое / под ред. Т.В. Овчинниковой. Международный издательский дом Германии Lambert Academic Publishing, 2020. 82 с. (ISSN – 978-620-0-47417-9).

5. Распоряжение правительства РФ от 03.12.2014 №2446-р (ред. от 05.04.2019) «Об утверждении Концепции построения и развития аппаратно-программного комплекса «Безопасный город»».

6. Овчинникова Т.В. Шаги решения концепции «Безопасный регион»: монография. Овчинникова Т.В., Смольянинов В.М., Куприенко П.С. и др. Воронеж. Издательство «Цифровая полиграфия». 2018. 334 с.

7. Федеральный закон от 27.12.2002 №184-ФЗ (ред. 11.06.2021) «О техническом регулировании».

8. Федеральный закон от 31.07.2020 №248-ФЗ (ред. 11.06.2021) «О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации».

9. Федеральный закон от 30.12.2008 №307-ФЗ (ред. 11.06.2021) «Об аудиторской деятельности».

10. Распоряжение Правительства РФ от 31.12.2020 №3709-р «Об утверждении Концепции развития аудиторской деятельности в Российской Федерации».

11. Распоряжение Правительства РФ от 31.12.2020 №3683-р «Об утверждении Плана законопроектной деятельности Правительства РФ на 2021 год».

12. ГОСТ Р ИСО 19011-2021 Национальный стандарт. Оценка соответствия. Руководящие указания по проведению аудита систем менеджмента.

## **References**

1. Mishon V.M. The Voronezh River and its basin: resources and water-ecological problems. Voronezh: VSU Publishing House, 2000. 296 p.

2. Razinkov N.D. Hydrological natural-technical systems: problems and regional management experience. Monograph. / Razinkov N.D., Ovchinnikova T.V., Kuprienko P.S., Ashikhmina T.V. Korpusov A.Yu. Voronezh: Publishing house «Digital Polygraphy», 2019. 132 p.

3. SP 58.13330.2012 Code of Rules. Hydraulic structures. Basic provisions. Actualized edition Snip 33-01-2003.

4. Razinkov N.D., Kuprehenko P.S., Ovchinnikova T.V. Ecological and geodynamic and natural systems. Collection. The edition is first / ed. T.V. Ovchinnikova.

- International Publishing House of Germany Lambert Academic Publishing, 2020. - 82 p. (ISSN - 978-620-0-47417-9).

5. Order of the Government of the Russian Federation of 03.12.2014 №2446-P (ed. Dated 04/05/2019) «On approval of the Concept for the construction and development of the hardware and software complex Safe City».

6. Ovchinnikova T.V. Steps to solve the concept of "Safe region": monograph. Ovchinnikova T.V., Smolyaninov V.M., Kuprienko P.S. And others. Voronezh. Publishing House «Digital Polygraphy». 2018. 334 p.

7. Federal Law dated December 27, 2002 No. 184-FZ (ed. 11.06.2021) «On Technical Regulation».

8. Federal Law of 07/31/2020 No. 248-FZ (ed. 11.06.2021) «On State Control (Supervision) and Municipal Control in the Russian Federation».

9. Federal Law of December 30, 2008 No. 307-FZ (ed. 11.06.2021) «On audit activities».

10. Order of the Government of the Russian Federation of 31.12.2020 No. 3709-R «On approval of the concept of the development of audit activities in the Russian Federation».

11. The order of the Government of the Russian Federation of 31.12.2020 No. 3683-P «On approval of the Plan of Basic Activities of the Government of the Russian Federation for 2021».

12. GOST R ISO 19011-2021 National Standard. Compliance assessment. Guidelines for auditing management systems.

---

**Разиньков Николай Дмитриевич** – канд. геогр. наук, доцент кафедры техносферной и пожарной безопасности Воронежского государственного технического университета

**Овчинникова Татьяна Валентиновна** – канд. биол. наук, доцент кафедры техносферной и пожарной безопасности, старший научный сотрудник Воронежского государственного технического университета

**Винокурова Ирина Михайловна** – канд. техн. наук, доцент кафедры химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

**Полянская Наталия Сергеевна** – студентка 3-го курса, группа бЧС-191, факультет инженерных систем и сооружений Воронежского государственного технического университета.

**К Юбилею Козлова Владимира Анатольевича**



Заведующему кафедрой строительной механики Воронежского государственного технического университета доктору физико-математических наук, доценту, члену редакционной коллегии нашего журнала Владимиру Анатольевичу Козлову 23 декабря 2021 г. исполнилось 60 лет.

По окончании с золотой медалью средней школы г. Воронежа и дипломом с отличием Воронежского государственного университета Владимир Анатольевич продолжил обучение с 1985 года в аспирантуре Воронежского инженерно-строительного института на кафедре теоретической механики. После аспирантуры он работал на той же кафедре в должности ассистента, старшего преподавателя, доцента, профессора, заведующего кафедрой. С 2018 г. занима-

ет должность зав. кафедрой строительной механики, в состав которой вошёл коллектив кафедры теоретической и прикладной механики.

В 1989 г. Козлов В.А. защитил кандидатскую диссертацию в Саратовском государственном университете им. Н.Г. Чернышевского, а в 2004 г. – докторскую диссертацию в Казанском государственном университете. Область научных интересов – теория и расчёт оболочек сложных форм, тонкостенных пространственных систем, мостовых и дорожных конструкций. Учёное звание доцента присвоено по кафедре теоретической механики в 1993 г.

За 36 лет добросовестного труда В.А. Козлов в педагогической деятельности создал уникальную методику преподавания курса теоретической механики для инженеров-строителей, позволяющую студентам технического профиля усваивать физико-математическую дисциплину, а преподавателям воспитывать квалифицированных специалистов; в науку внёс определённый вклад в развитие теории и методов расчёта тонкостенных пространственных конструкций. В.А. Козлов является автором более 100 научных работ, из которых 28 в изданиях из списка ВАК, 13 рецензируемых в базах Web of Science и Scopus, 1 патента и монографии; опубликовал 13 учебно-методических работ, в том числе 1 учебное пособие.

Козлов В.А. является членом дисс. советов Д 24.2.286.02, Д 24.2.286.05 при ВГТУ в качестве специалиста в областях: строительная механика, проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей. Под руководством В.А. Козлова подготовлена и защищена 1 кандидатская диссертация, в настоящее время осуществляется научное консультирование 4-х аспирантов и 2-х соискателей.

Козлов В.А. является заместителем главного редактора рецензируемого научного журнала «Строительная механика и конструкции», включенного Высшей аттестационной комиссией в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендуемых для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, а также членом редакционных коллегий ряда научно-технических изданий ВГТУ.

Козлов В.А. является руководителем образовательной программы аспирантуры «Техника и технологии строительства», направленность «Строительная механика», руководителем НИОКР разработанных и введённых в действие с 1.06.21 г. ГОСТ Р «Дороги автомобильные общего пользования. Мостовые сооружения. Правила расчета при усилении железобетонных балочных пролетных строений» и «Дороги автомобильные общего пользования. Мостовые сооружения. Правила объединения балочных разрезных пролетных строений в температурно-неразрезные по железобетонной плите проезжей части», а также еще трёх разрабатываемых ГОСТ Р в этой области.

За многолетний и добросовестный труд, весомый вклад в воспитание, подготовку высококвалифицированных специалистов для строительной отрасли Воронежской области и РФ, высокие достижения в научно-исследовательской работе Козлов В.А. отмечен благодарственным письмом Воронежской городской думы (2010 г.), грамотами ректоров ВГАСУ (2006, 2015 гг.) и ВГТУ (2019 г.), имеет благодарности с занесением в трудовую книжку. В 2017 году за значительные заслуги в сфере образования и многолетний добросовестный труд Козлову В.А. присвоено звание «Почётный работник сферы образования Российской Федерации».

Ректорат, коллектив кафедры и редакционной коллегии нашего журнала искренне поздравляют Владимира Анатольевича Козлова с Юбилеем, желают ему творческих успехов и здоровья!

*Проскурин Д.К., Панфилов Д.В., Рудаков О.Б.*

## **Юбилей Шелеховой Наталии Викторовны**



Заведующей лабораторией хроматографии ВНИИПБТ, члену редколлегии нашего журнала, доктору технических наук Шелеховой Наталии Викторовне 17 января 2022 г. исполнилось 50 лет.

За 21 год работы во ВНИИПБТ Шелехова Н.В. прошла путь от инженера до заведующей лабораторией. В 2017 г. Наталия Викторовна защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук в ФГБОУ ВО ВГУИТ по специальности 05.18.07 - Биотехнология пищевых продуктов и биологически активных веществ, посвященную решению важной проблемы - развитию научно-практических основ комплексной системы контроля и регулирования технологических процессов производства этилового спирта и спиртных напитков, основанной на применении современного аналитического оборудования, высокоэффективных инструментальных методов анализа: газовой хроматографии, капиллярного электрофореза, газовой хромато-масс-спектрометрии и информационных технологий.

Под ее руководством и при ее непосредственном участии разработаны и внедрены в практику аналитического контроля инструментальные экспрессные методики качественного и количественного определения химического состава

продуктов, полупродуктов и отходов спиртового и ликёро-водочного производства. Разработана нормативная документация 12 межгосударственных и национальных стандартов, которые нашли широкое применение не только на территории России, но и в Армении, Азербайджане, Беларуси, Вьетнаме, Казахстане, Киргизии, Латвии, Монголии, Молдове, Таджикистане, Узбекистане и в других государствах. Разработаны межгосударственные стандартные образцы состава растворов токсичных микропримесей в этиловом спирте и водках, предназначенные для поверки и градуировки газовых хроматографов, контроля точности результатов измерений показателей качества и безопасности алкогольной продукции.

Плодотворная научная деятельность, глубокие профессиональные знания, высокий уровень компетентности Наталии Викторовны снискали признание и уважение коллег. Шелехова Н.В. является автором 127 научных работ, в том числе 57 публикаций в журналах, входящих в перечень ВАК, 3 патентов РФ, 2 монографий, 15 Свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Материалы работ по газовой хроматографии, капиллярному электрофорезу и хромато-масс-спектрометрии экспонировались на российских и международных выставках и отмечены дипломами и медалями.

В целях популяризации научных разработок Шелехова Н.В. выступает с докладами на международных и российских научных конференциях и осуществляет консультационную, методическую и техническую поддержку, с выездом на предприятия отрасли проводит обучение сотрудников производственных лабораторий работе на газовых хроматографах, хромато-масс-спектрометрических системах, системах капиллярного электрофореза. За значительные заслуги в сфере науки и многолетний добросовестный труд Шелехова Н.В. награждена почетной грамотой в связи с 90-летием ВНИИПБТ.

Коллектив журнала «Химия, физика и механика материалов» и коллеги поздравляют Наталию Викторовну с юбилеем и желают крепкого здоровья, личного счастья, успехов в работе, новых творческих и научных достижений.

*Рудаков О.Б., Полянский К.К., Хорохордин А.М.*

**Научное издание**

**ХИМИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ**

**Выпуск № 1 (32), 2022**

Научный журнал

В авторской редакции

*Дата выхода в свет: 12.04.2022.  
Формат 60×84 1/8. Бумага писчая.  
Усл. печ. л. 17,4. Уч.-изд. л. 9,9.  
Тираж 500 экз. Заказ № 102  
Цена свободная*

---

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»  
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Отпечатано: отдел оперативной полиграфии издательства ВГТУ  
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84